

GEOQUIMICA HIDROTHERMAL DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

J. J. Fausto L., A. Sánchez A., M. E. Jiménez S.,
I. Esquer P. y F. Ulloa H.
Comisión Federal de Electricidad
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto
Mexicali, B. C.

RESUMEN

La planta geotérmica de Cerro Prieto tiene, en la actualidad, 150 000 kW de capacidad y cuenta con cuatro unidades turbogeneradoras de 37500 kW cada una. Diecinueve pozos geotérmicos abastecen a las unidades 1 y 2, 8 pozos abastecen a las unidades 3 y 4 y otros 3 están pendientes de entrar en operación. Se han terminado, además, 10 pozos, de un total de 22, que alimentarán a las unidades de otra planta denominada Cerro Prieto II.

En el presente trabajo se exponen los resultados observados a través del tiempo, principalmente en los dos últimos años, en las variaciones químicas y procesos físicos ocurridos en el campo geotérmico de Cerro Prieto, debido a su explotación.

Se utilizaron los datos de los análisis químicos efectuados en muestras de agua recolectadas en los pozos geotérmicos.

Se pretende conocer cuál es la distribución de algunos constituyentes químicos en el campo, trazándose sus contornos de distribución, y con base en esto tratar de interpretar cuál ha sido el movimiento de fluidos en el acuífero.

En tablas y figuras se presentan datos de los constituyentes químicos encontrados en los fluidos analizados.

LOCALIZACION DE POZOS GEOTERMICOS

En la figura 1 está indicada la localización de algunos de los pozos en el campo geotérmico de Cerro Prieto. A la fecha, octubre de 1979, se han perforado 71 pozos. Están señalados los pozos que actualmente están en producción y suministran vapor a las unidades 1, 2, 3 y 4, de los cuales se tiene mayor número de datos químicos. Los pozos que abastecen vapor a las unidades 1 y 2 son: M-5, M-8, M-11, M-14, M-19A, M-21A, M-25, M-26, M-27, M-29, M-30, M-31, M-35, M-42, M-45, M-53, M-114, M-130 y M-181. Son 19 pozos en total. Otros 8 pozos abastecen a las unidades 3 y 4, éstos son: M-48, M-50, M-51, M-84, M-90, M-91, M-103 y M-105. Se muestran, además, los pozos M-101, M-102 y M-104 que están pendientes de entrar en

operación. Se observan también los pozos M-7, M-43, M-93, M-110, Q-757 y T-366, los cuales se han calentado y desarrollado en 1979, contándose para éstos con información química reciente. Este plano de localización servirá de ayuda para situar al lector en algunas figuras que se presentan en este trabajo.

DISTRIBUCION DEL INDICADOR Na-K-Ca EN EL ACUIFERO (1979)

Según el contorno de distribución del indicador sodio-potasio-calcio en el Acuífero de Cerro Prieto (Fig. 2), se pretenderá interpretar el movimiento que sufre el agua subterránea. El modelo mostrado propone una posible alimentación de agua, de menor temperatura, por la parte NO, debido a que se tiene un índice de 1.1 unidades en el pozo Q-757 y 0.82 en el M-7. Esta posibilidad se apoya en la existencia, en esta zona, de horizontes de areniscas bastante permeables,¹ y por la información de los pozos M-114 y M-43 con valores del índice de 0.83 y 0.99 unidades, respectivamente.

En la parte central del campo originalmente explotado, se observan grandes variaciones en los valores de los índices. Se tiene el contorno de 0.70 unidades que pasa por los pozos M-5, M-11, M-19A y M-25. El pozo M-20 presenta un índice de 0.65 unidades y el M-26 de 0.80, siendo el valor más bajo en esta parte del campo. Hacia el O se tiene el M-29 con un valor de 0.84 y al E el M-14 con 0.81 unidades, haciendo suponer que existe una percolación o invasión de agua de menor temperatura en esta parte del campo al acuífero productor.

Hacia la parte NE y SE se encuentran los pozos M-53, M-84 y M-104 que presentan el contorno de 0.53 unidades, siendo estos valores los más bajos de toda el área actual del campo. Estos pozos coinciden con el trazo de la falla Hidalgo. Al SO y SE, pasando por los pozos M-45, M-102, M-105 y T-366, se extiende el contorno de 0.60 unidades, y rodeando a éste se tiene el del índice de 0.61 unidades que cruza por los pozos M-48, M-51 y M-91; encerrado en estos contornos se observa al pozo M-103 con índice de 0.56 unidades. Hacia el S está situado el M-101,

que presenta el índice más alto de esta parte nueva del campo y es de 0.71 unidades, esto se debe, quizá, a un probable flujo de agua fría proveniente de la parte SO de la Laguna Volcano, o a que este pozo fue alimentado por un acuífero de menor temperatura y de menor profundidad.

DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS BASE Na-K-Ca EN EL ACUIFERO DE CERRO PRIETO (1979)

Con el auxilio del índice NaKCa promedio encontrado para los pozos geotérmicos durante 1979 (tablas 3 y 4), y utilizando la ecuación del geotermómetro "Na-K-Ca" ya calibrada,² se calcularon las temperaturas del agua alimentadora, trazándose los contornos de su distribución en el área del campo actual en explotación (Fig. 3).

Con temperatura de 210°C se confirma la entrada de agua de menor temperatura por la parte NO del campo. Se tienen además los pozos M-7 y M-114 con temperaturas de 260°C. El M-43 presenta 220°C, confirmada por su alto índice (0.99).

Como se mencionó anteriormente, en la parte central del campo se observaron grandes contrastes. Se tiene el contorno de 290°C que presentan los pozos M-5, M-11, M-19A y M-25. El de 260°C y 300°C en los pozos M-26 y M-20. Hacia el O y E de esta área se observan probables entradas de agua de menor temperatura en los pozos M-29 y M-14 que presentan valores de 260°C.

Los pozos M-45, M-48, M-51, M-91, M-102, M-105 y T-366 están en el contorno de 320°C. El contorno de 310°C atraviesa por los pozos M-90, M-93 y M-181. El pozo M-101 al S del campo presenta 290°C de temperatura, los pozos M-53 y M-84 presentan las temperaturas más altas, con valores de 340°C. En el pozo M-104, también localizado en la nueva zona de C. P. II, se observa una temperatura elevada de 330°C.

Se puede concluir que el área de pozos que alimentan a las unidades 3 y 4 es más grande que la originalmente explotada, y que la temperatura base geotermómetro NaKCa de los pozos estudiados se encuentra en la gama de 210°C a 340°C.

En la figura 3a se muestran los valores promedio de temperatura (NaKCa) para la mayoría de los pozos utilizados durante 1979 para alimentar la planta geotermoelectrica. Los valores más altos fueron observados en los pozos M-84 y M-53 (~ 340°C) y los más bajos en los pozos M-29 y M-114 (~ 255°C). La temperatura promedio de todos ellos resultó de 294°C; observando una diferencia de 42°C en los valores para los pozos del área nueva (unidades 3 y 4) con la antigua, (unidades 1 y 2), ya que en los primeros se observó un valor de temperatura promedio de 319°C, en tanto que en los pozos viejos fue de 277°C.

DISTRIBUCION DE CLORUROS EN EL ACUIFERO DE CERRO PRIETO (1979)

Las concentraciones de cloruros en el acuífero de Cerro Prieto, durante 1979, mostradas en la figura 4, son valores promedio. En el área de pozos de las unidades 1 y 2 se observan grandes contrastes. El pozo M-26 muestra el valor más bajo, de 6000 ppm contra 10000 ppm en el M-19A. Se tiene el contorno de 9000 ppm en los pozos M-5, M-11, M-25, M-29 y M-30, y otro de 8000 ppm en los pozos M-14, M-21A, M-35, M-42 y M-43. Esta distribución anómala se atribuye al abatimiento de presión en el yacimiento que ocasiona movimiento vertical de agua menos salina de acuíferos superiores a inferiores. El bajo contenido de cloruro en el pozo Q-757 (6000 ppm) confirma la existencia de agua menos salina en esa zona.

Los pozos recientemente perforados presentaron los siguientes valores: 12000 ppm en el M-102 y el M-105; 11000 ppm en los pozos M-48, M-103 y T-366; 10000 ppm en los pozos M-84, M-45, M-181 y M-91. En los pozos M-53, M-104, M-51 y M-93 las concentraciones fueron de 9000 ppm. En los pozos M-50 y M-90 se observaron 7000 ppm y en el M-101, 5000 ppm.

CAMBIOS DE CONCENTRACION DE CLORUROS EN EL ACUIFERO Y DE TEMPERATURA BASE NaKCa PARA POZOS-PRODUCCION (1978-1979)

Debido a los procesos físicos que ocurren en el acuífero durante la explotación, la concentración de los componentes químicos en el agua descargada por los pozos ha variado con el tiempo y su localización en el campo. Estos procesos pueden ser de:

1. Transferencia de calor entre roca y agua
2. Dilución por otras aguas
3. Pérdidas o ganancias de vapor.

Las concentraciones de cloruros en la profundidad y los valores de temperatura son muy útiles para explicar los tipos de procesos que ocurren en el sistema antes y durante la explotación.

En las figuras 5a y 5b se pretende explicar gráficamente los cambios observados en la concentración de cloruros calculados para el acuífero, con relación a los valores de temperatura, base NaKCa, observados para los pozos productores durante 1978 y 1979, sin tomar en cuenta los nuevos pozos que entraron en producción en 1979.

Las siguientes son las principales observaciones que se considera conveniente mencionar:

En el pozo M-5 los cloruros permanecieron casi constantes entre 8892 y 8945 ppm; su temperatura descendió de 294°C a 287°C con un decremento de 7°C, explicándose el proceso por una ligera pérdida de calor por

conducción. El M-14 presenta ligero cambio de cloruros de 8168 a 8100 ppm, con una disminución de temperatura de 267°C a 261°C, caso parecido al del M-5.

El pozo M-11 mostró un aumento de cloruros de 9100 a 9250, en tanto que su temperatura descendió de 300°C a 291°C, explicándose esto por una concentración de cloruros debido a ebullición en el yacimiento del agua que alimentó al pozo originando pérdidas de vapor, causada por el decremento de la presión de fondo en las vecindades del pozo. Igual comportamiento manifestaron los pozos M-19A, M-27 y M-42.

En el fluido que alimenta a los pozos M-8, M-46, M-21A, M-25, M-26, M-30, M-31, M-35 y M-45 se observó una marcada tendencia de disminución en el contenido de cloruros, efecto causado por dilución de agua menos caliente proveniente de estratos superiores, provocando que disminuyera la temperatura del fluido.

En conclusión, de acuerdo a los valores calculados con el indicador NaKCa, la tendencia general mostrada por los pozos localizados en la parte central del campo originalmente explotado fue de una disminución de la temperatura del fluido, siendo el valor promedio de dicha disminución de 8°C. El abatimiento en esta área ha sido mencionado por otros autores,^{2/3} siendo éste un reflejo de la aparente sobreexplotación de los pozos productores, los cuales se encuentran muy próximos entre sí, siendo los procesos o cambios físicos normales al comportamiento de yacimientos geotérmicos.

El comportamiento de los cloruros confirma la presencia de tres tipos de procesos en el campo explotado; esto es: transferencia de calor (M-5), dilución (M-8/46) y concentración por pérdida de vapor (M-11).

DISTRIBUCION DE POTASIO EN EL ACUIFERO (1979)

En la figura 6, la distribución de los valores de la concentración del potasio (en ppm) calculados en el acuífero para los pozos indicados confirma los modelos de distribución propuestos con el índice NaKCa y la temperatura obtenida con el geotermómetro NaKCa.

En el área central se observa un valor de 700 ppm en el pozo M-26 y un contorno de 1100 ppm rodeando a los pozos M-5, M-20, M-25 y M-30. Los pozos M-114 y M-29 presentan valores de 800 ppm; el Q-757, 300 ppm y el M-7, 600 ppm. Los valores más elevados se observaron en los pozos M-105 y M-102 (1800 ppm).

En la parte S del campo se observaron contenidos de 600 ppm en el M-101 y 1000 ppm en los pozos M-90 y M-50.

VARIACIONES DEL CONTENIDO DE SILICE

Los valores anuales promedio de las concentraciones de sílice en el acuífero, en partes por millón (ppm), se indican en las figuras 7a, 7b y 7c. La tendencia general observada en 1979 para los pozos del área antigua ha sido la de disminuir ligeramente con respecto a los valores de 1978. El porcentaje de decremento total aproximado es del 10%. Los pozos M-14, M-26, M-27, M-31 y M-35 son los más afectados, mostrando decrementos en su concentración de 88, 118, 120, 71 y 90 ppm respectivamente. Este decremento en la concentración de sílice parece indicar que en 1979, en la parte central del campo, se produjo una depositación de cuarzo en las formaciones permeables, causado probablemente por un ligero abatimiento de la temperatura, lo cual parece indicar que la ebullición en el acuífero ha continuado.

Para los pozos nuevos, como el M-51, el M-91 y el M-105, que entraron en operación en 1979, se muestran, en la misma figura, los valores promedio de contenido de sílice comparándolos con los obtenidos en 1978, cuando estos pozos estuvieron en desarrollo, notándose una ligera tendencia a disminuir. Se considera que los datos de 1978 no son representativos, ya que las muestras fueron tomadas cuando el pozo estuvo fluyendo por orificio de diámetro pequeño.

Para el resto de los pozos se indica la concentración promedio de SiO₂ durante 1979 (pozos M-50, M-48, M-103 y M-84); esperando contar con más datos en 1980 para explicar su comportamiento.

DISTRIBUCION DE SILICE EN EL ACUIFERO (1979)

En la figura 9 se presentan los valores de contenido de sílice en el acuífero, redondeados a ± 100 ppm. Se observa el contorno de 600 ppm en el área central del campo. Los pozos M-5, M-11 y M-19A presentan valores anómalos de 700 ppm en tanto que hacia el E de esta área (M-114) y hacia el O (M-29 y M-43) se observa que disminuye a 500 ppm. En los pozos situados al S se observa un contenido de 700 ppm, a excepción del pozo M-90 con 600 ppm y 400 ppm en el M-101, siendo éste el valor más bajo obtenido. El valor más alto observado en los pozos recientemente perforados fue en el T-366 con 800 ppm.

VARIACIONES DE TEMPERATURAS EN LOS POZOS; CALCULADAS CON EL GEOTERMOMETRO NaKCa

Las variaciones en la temperatura del acuífero geotérmico de Cerro Prieto, durante su explotación, han sido registradas continuamente utilizando el geotermómetro NaKCa. Las variaciones anuales promedio para algunos de los pozos se observan en las figuras 9a y 9b. Los pozos M-84, M-103 y M-104 presentaron las más altas temperaturas durante 1979. En el M-45 la tendencia ha sido de disminuir desde 338°C en 1977 a 335°C en 1978 y 320°C

en 1979. Los pozos M-21A, M-26, M-27, M-31 y M-35 situados en el área antigua, han disminuido gradualmente su temperatura. El M-21A y el M-26 han sido los más afectados por esta disminución; el M-21A empezó su producción con temperaturas de 305°C en 1973, disminuyendo gradualmente hasta 284°C en 1978 y 270°C en 1979, en tanto que el pozo M-26, con temperatura inicial de 320°C en 1973, disminuyó a 272°C en 1978 y a 263°C en 1979.

COMPOSICION QUIMICA DE LOS POZOS; OBSERVADA DURANTE 1978 Y 1979

En la tabla 1 se muestran los valores de la concentración de algunos constituyentes químicos en el acuífero del campo geotérmico. Son valores promedio de los análisis químicos efectuados en cada pozo durante 1978, en muestras recolectadas en los pozos en producción. En la tabla 3 se muestran los datos de los pozos productores analizados en 1979, son valores promedio calculados en las condiciones del acuífero.

Las tablas 2 y 4 contienen los resultados analíticos obtenidos cuando los pozos estuvieron en sus fases de calentamiento y desarrollo (1978 y 1979). Se muestran también los valores promedio de los índices químicos Na/K y Na/KCa, así como la temperatura calculada con el geotermómetro Na/KCa del agua alimentadora de los pozos, y los valores de las entalpías calculadas a la temperatura en el acuífero.

En la tabla 3 se observan las siguientes gamas de valores de concentración (en mg/l) de los constituyentes químicos de los pozos durante 1979:

Li: 7.6 a 19.2; Na: 3279 a 7387; K: 673 a 1801; Rb: 5.5 a 16.2; Mg: 0.04 a 1.1; Ca: 147 a 403; B: 6.2 a 15.7; Mn: .16 a 3.3; Cl: 6261 a 11932; HCO₃: 14.3 a 48.7; SO₄: 1.5 a 5.5; SiO₂: 513 a 705; STD (sólidos totales disueltos): 11625 a 21488.

En las figuras 10a, 10b y 10c se muestran los diagramas de Schoeller, donde se graficaron las concentraciones para algunos constituyentes químicos en una escala logarítmica, obteniéndose una representación gráfica de la composición química de los fluidos de los pozos. Los

datos para cada pozo están dispuestos en orden numérico y se marca la línea base de los diagramas.

Siguiendo los procedimientos descritos por E. Mazon y A. Mañón,⁴ de procesar gráficamente los datos químicos obtenidos de los pozos geotérmicos, se graficaron los valores de las concentraciones de: Na, K, Ca, Rb, B y SiO₂, contra las concentraciones de cloruros, encontrándose buenas correlaciones. Las concentraciones son valores promedio obtenidos en las muestras de agua separada a la presión atmosférica de los pozos que estuvieron en producción en 1979, quedando demostrado que los procesos de transferencia de calor, de concentración y de dilución continúan ocurriendo en el campo (véase figuras 11a a 11f inclusive).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al ingeniero A. Mañón M., Superintendente General de Estudios, por su apoyo y colaboración para la realización de este trabajo, así como a todo el personal técnico, administrativo y manual de la Superintendencia General de Estudios de la Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, CFE, que estuvo involucrado en este trabajo.

REFERENCIAS

1. Puente C., I. y A. de la Peña L., "Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto", *Proceedings/Actas. First symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, México*, San Diego, septiembre de 1978, pp. 17-40.
2. Mañón M., A., A. Sánchez A., J. J. Fausto L., M. E. Jiménez S., A. Jacobo R. e I. Esquer P., "Modelo geoquímico preliminar del campo geotérmico de Cerro Prieto", *Proceedings/Actas. First symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, México*, San Diego, septiembre de 1978, pp. 83-94.
3. Truesdell, A. H. et al., "Geochemical evidence of drawdown in the Cerro Prieto geothermal field", *Proceedings/Actas. First symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, México*, San Diego, septiembre de 1978, pp. 130-138.
4. Mazon, E. y A. Mañón M., "Geochemical tracing in producing geothermal fields: A case study at Cerro Prieto", *Proceedings/Actas. First symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, México*, San Diego, septiembre de 1978, pp. 102-118.

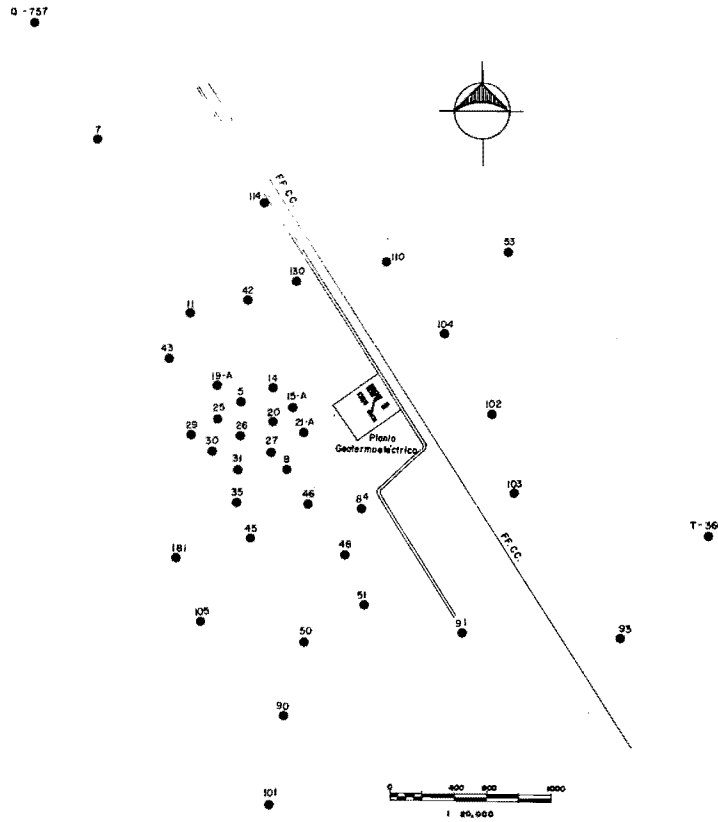


Figura 1. Localización de pozos en el campo geotérmico de Cerro Prieto.

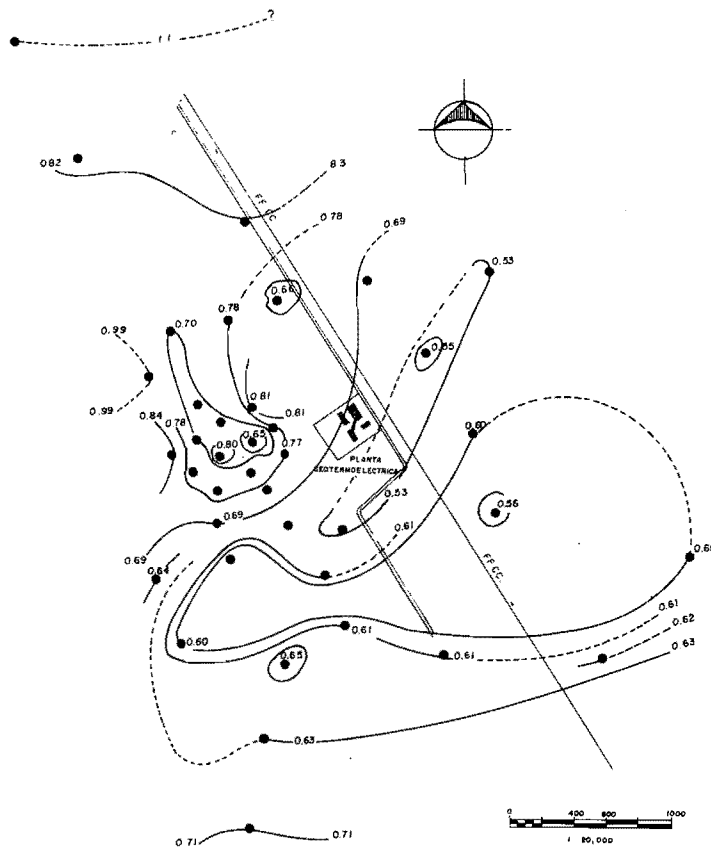


Figura 2. Distribución del indicador Na K Ca en el acuífero (1979).

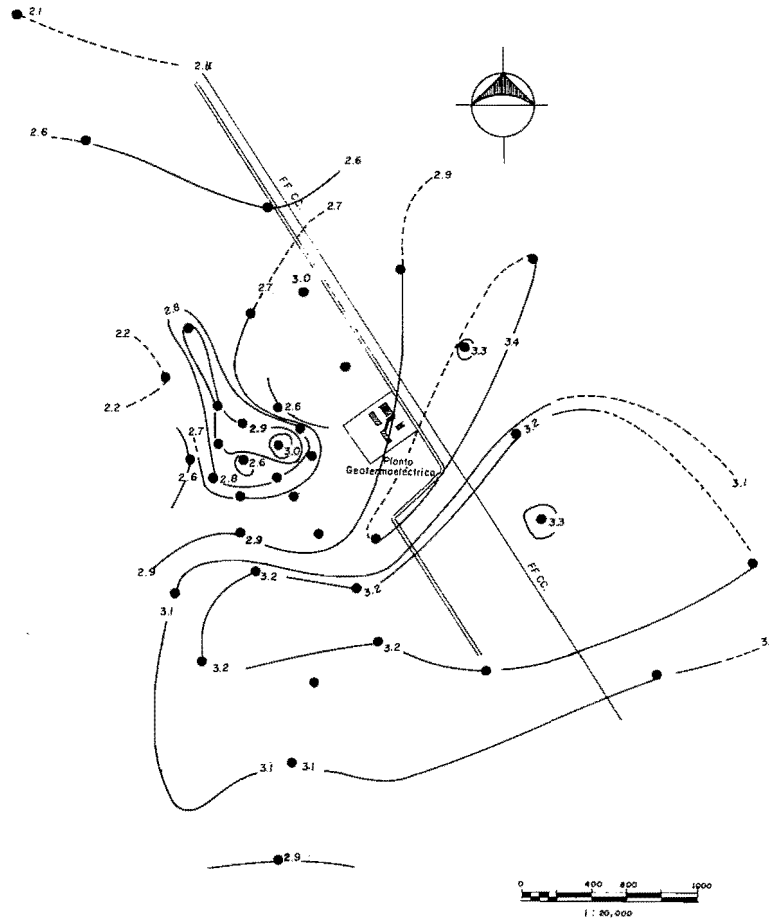


Figura 3. Distribución de temperaturas base Na K Ca (1979).
 $T \times 10^{-2} (^{\circ}\text{C})$

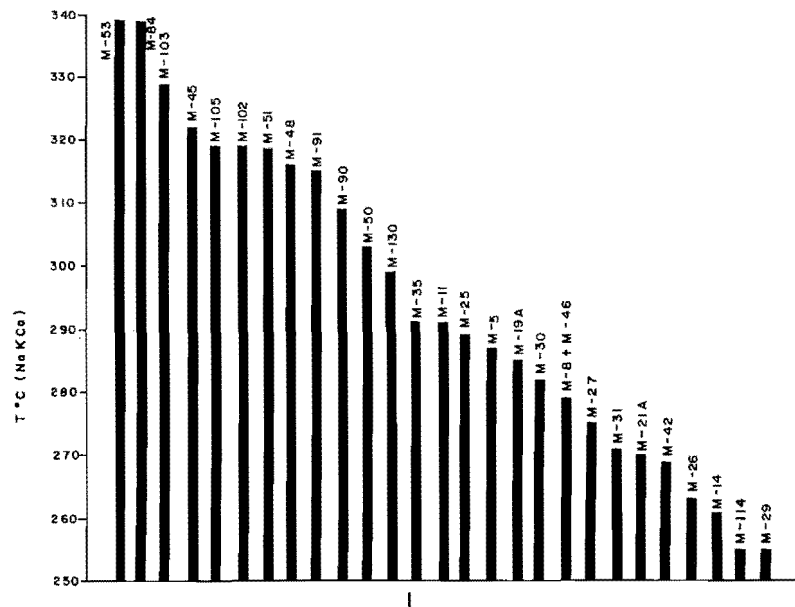


Figura 3a. Valores promedio de temperatura base Na K Ca. Pozos en producción (1979).

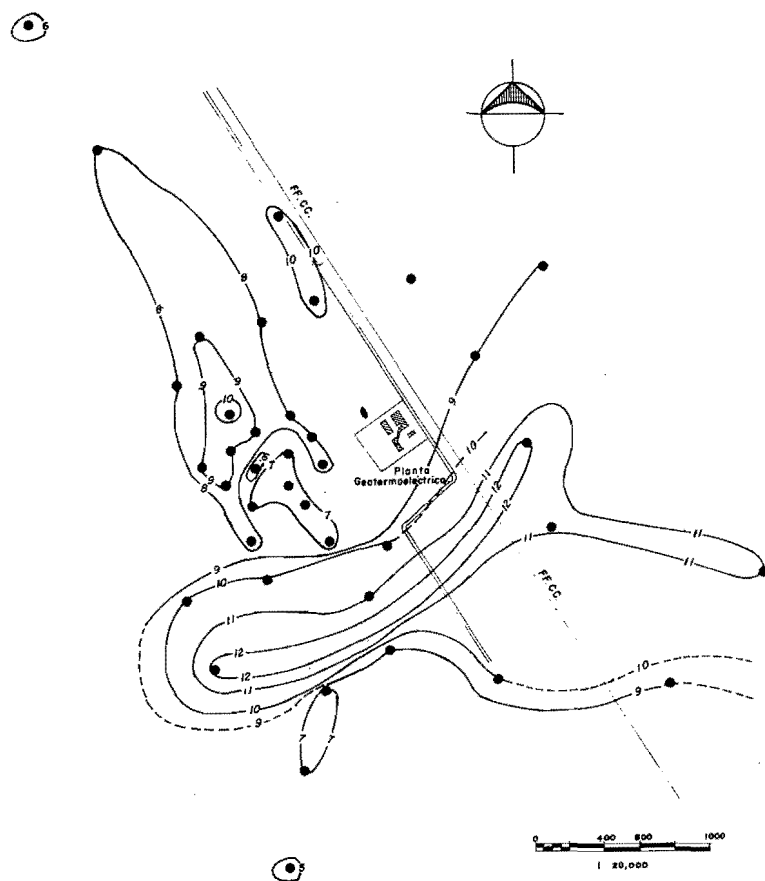


Figura 4. Distribución de cloruros en el acuífero (1979). $\text{mg/l} \times 10^3$

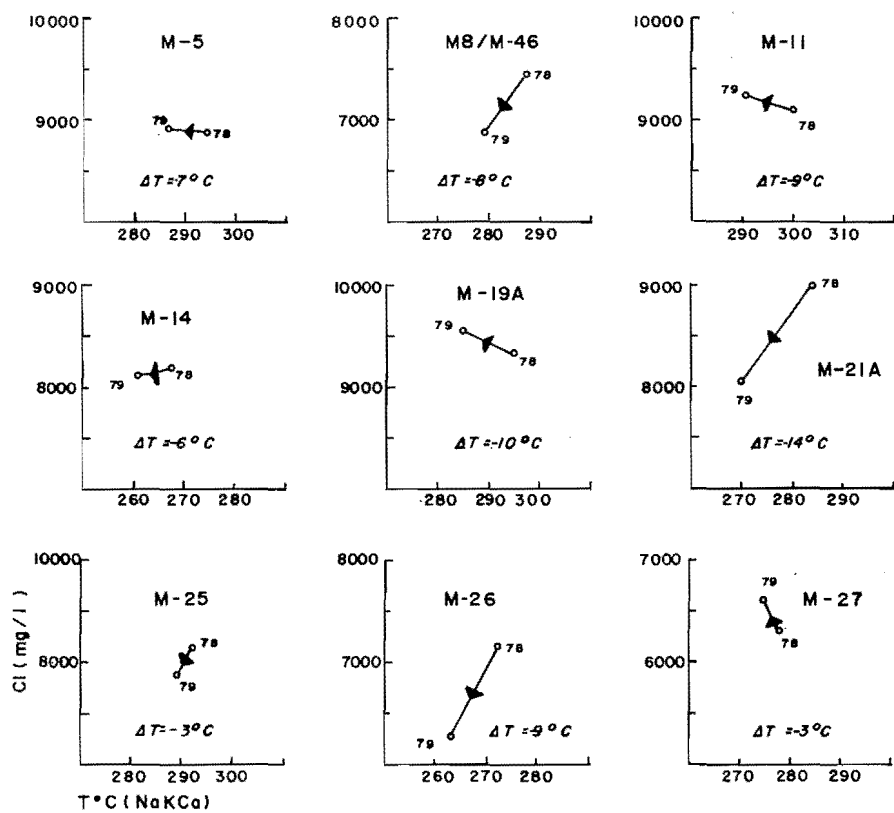


Figura 5a. Cambios en la concentración de cloruros en el acuífero y temperaturas base Na K Ca para pozos. Producción (1978-1979).

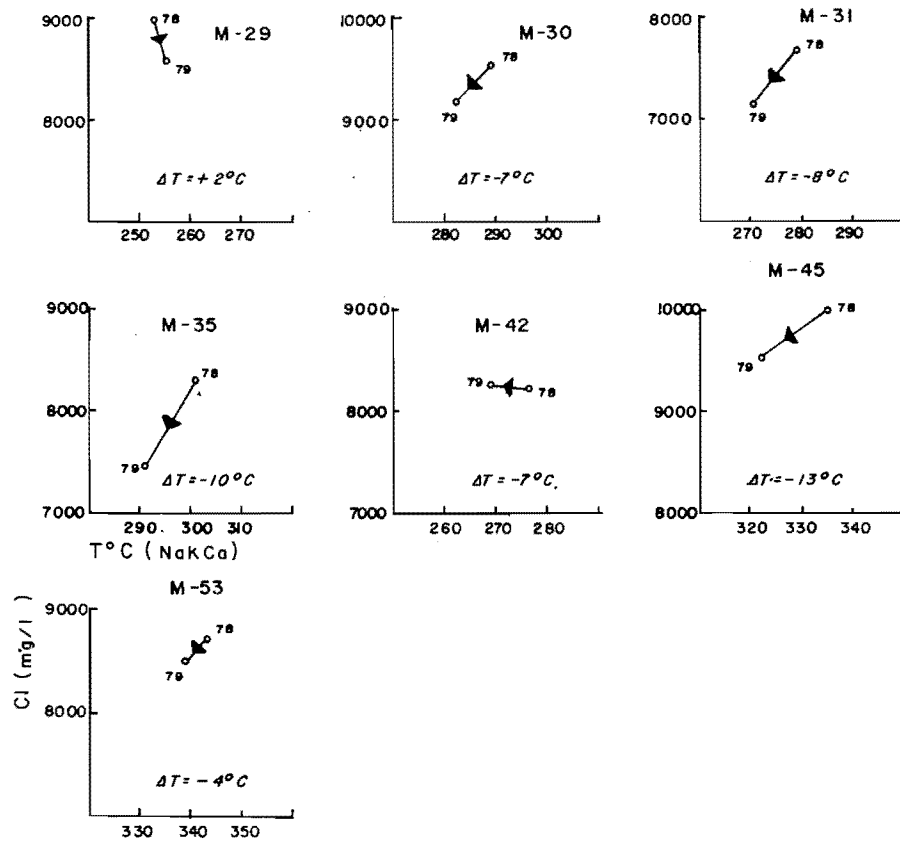


Figura 5b. Cambios en la concentración de cloruros en el acuífero y temperaturas base Na K Ca para pozos. Producción (1978-1979).

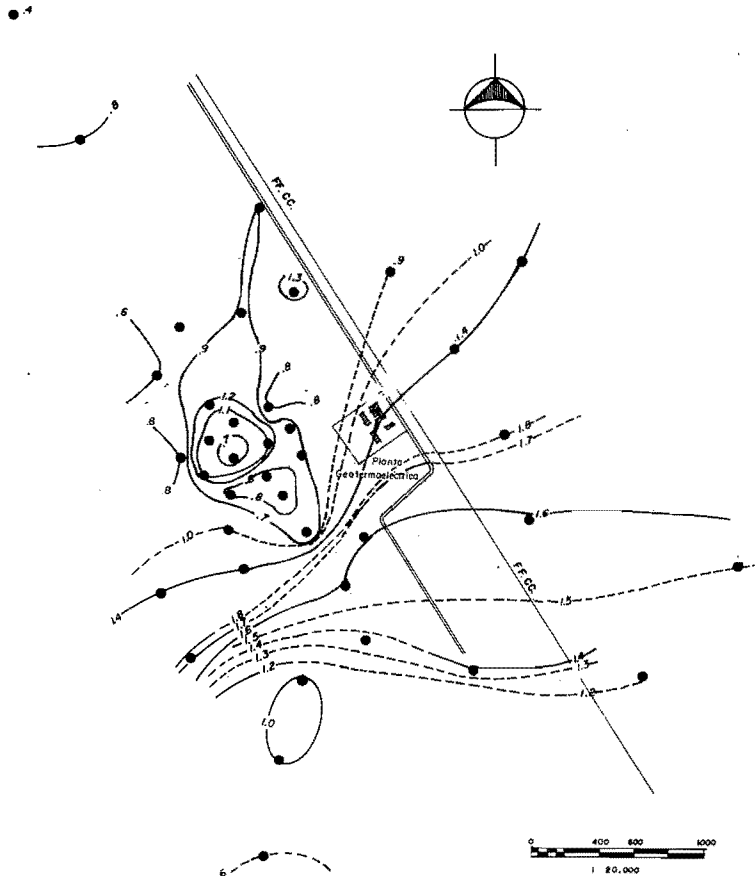


Figura 6. Distribución de potasio en el acuífero (1979). $\text{mg/l} \times 10^3$

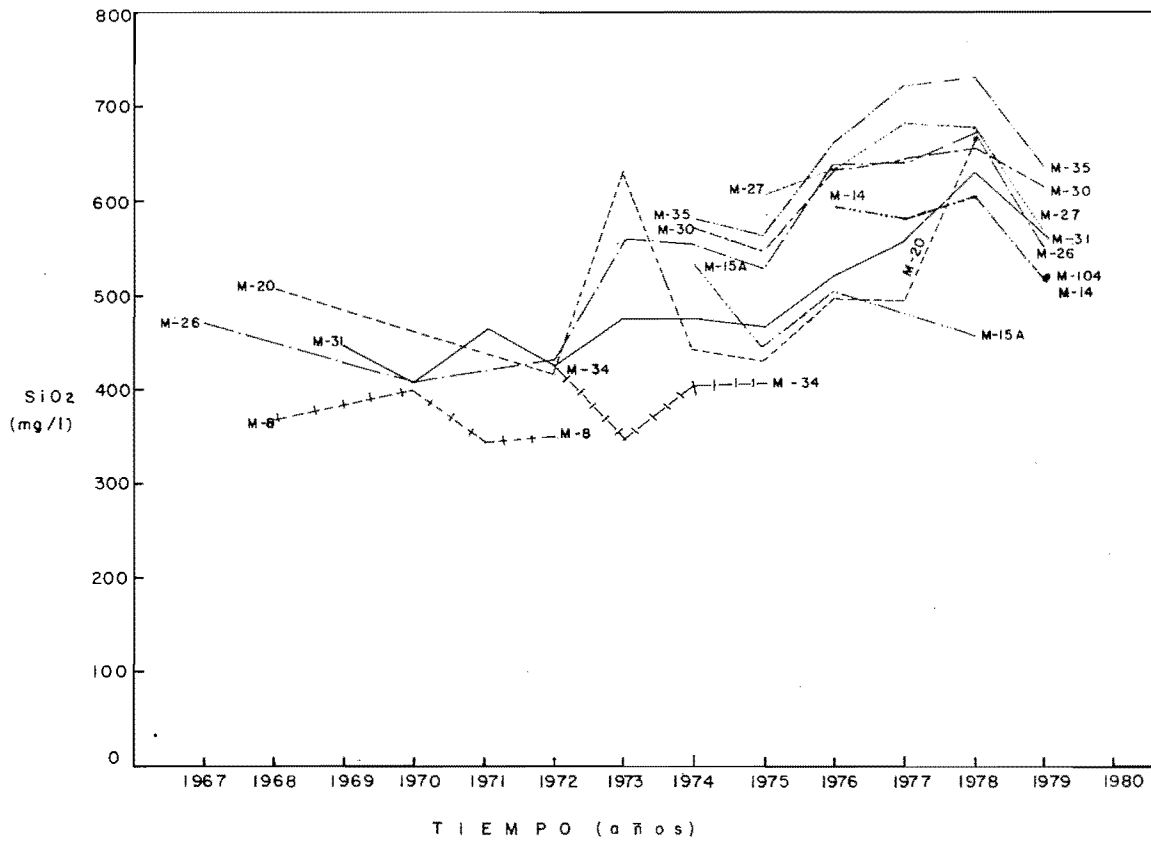


Figura 7a. Variaciones anuales del contenido de sílice en el acuífero (mg/l).

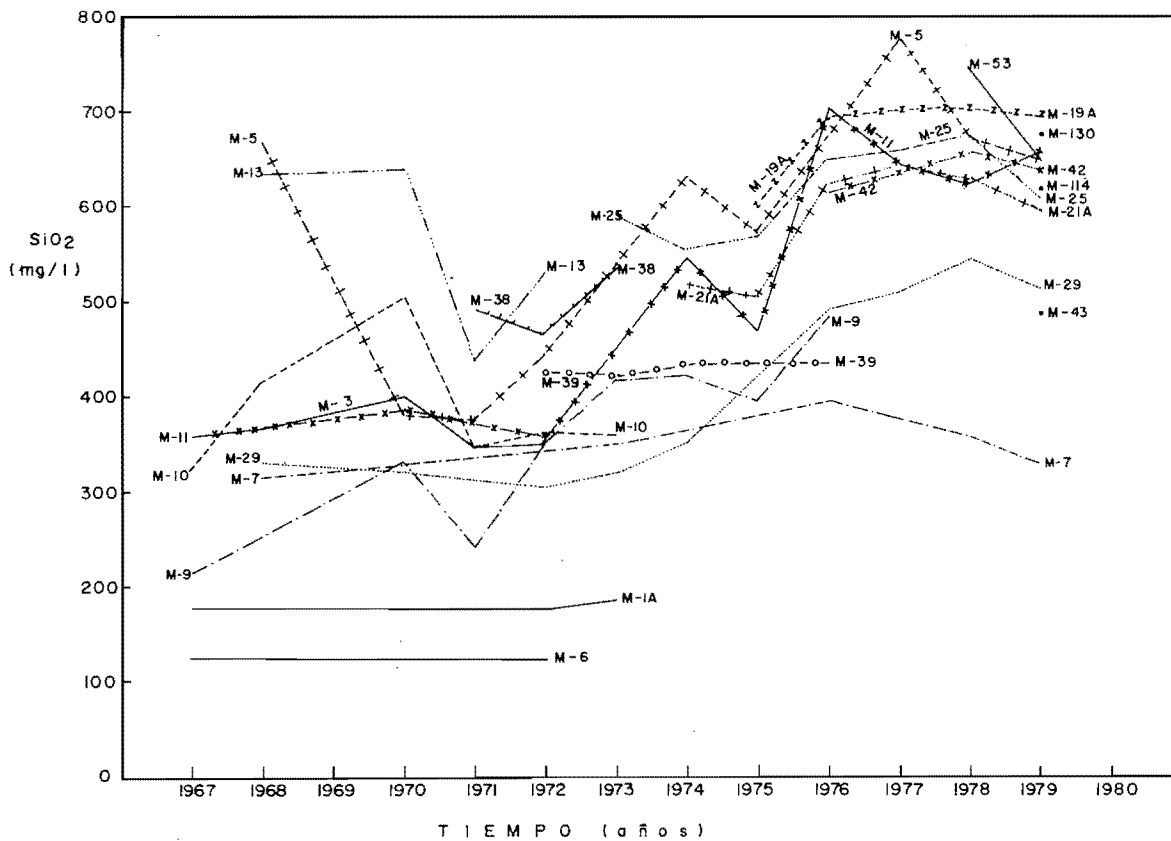
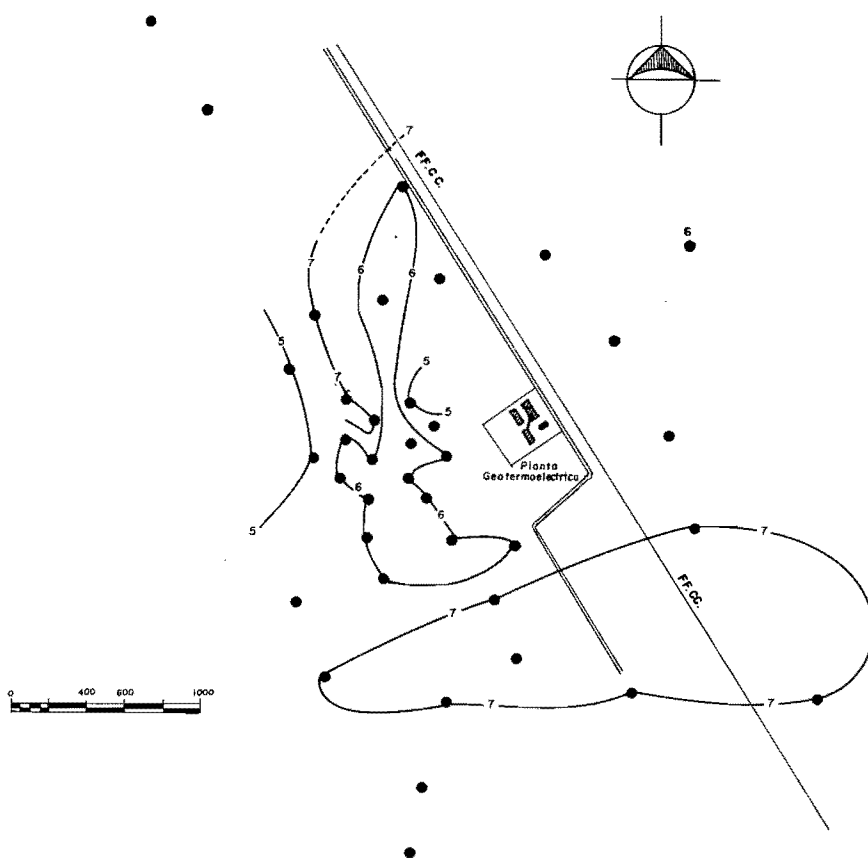
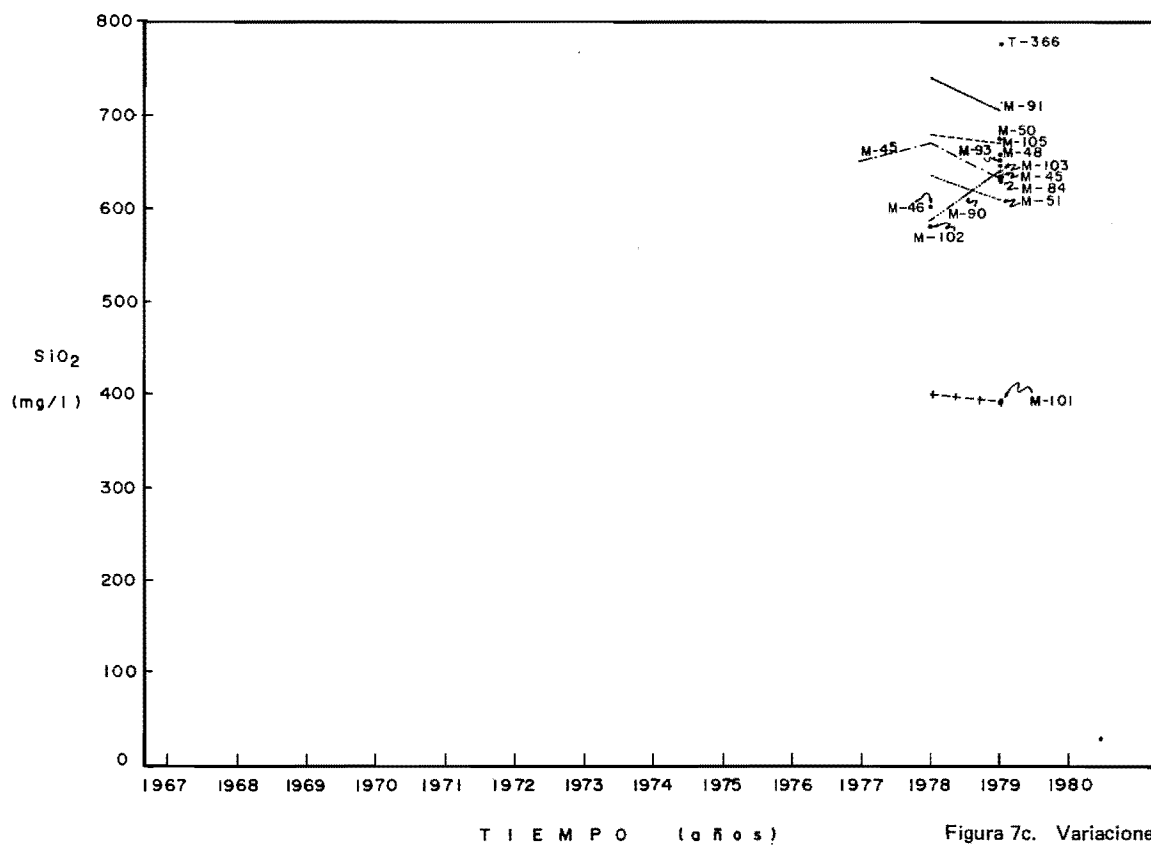


Figura 7b. Variaciones anuales del contenido de sílice en el acuífero.



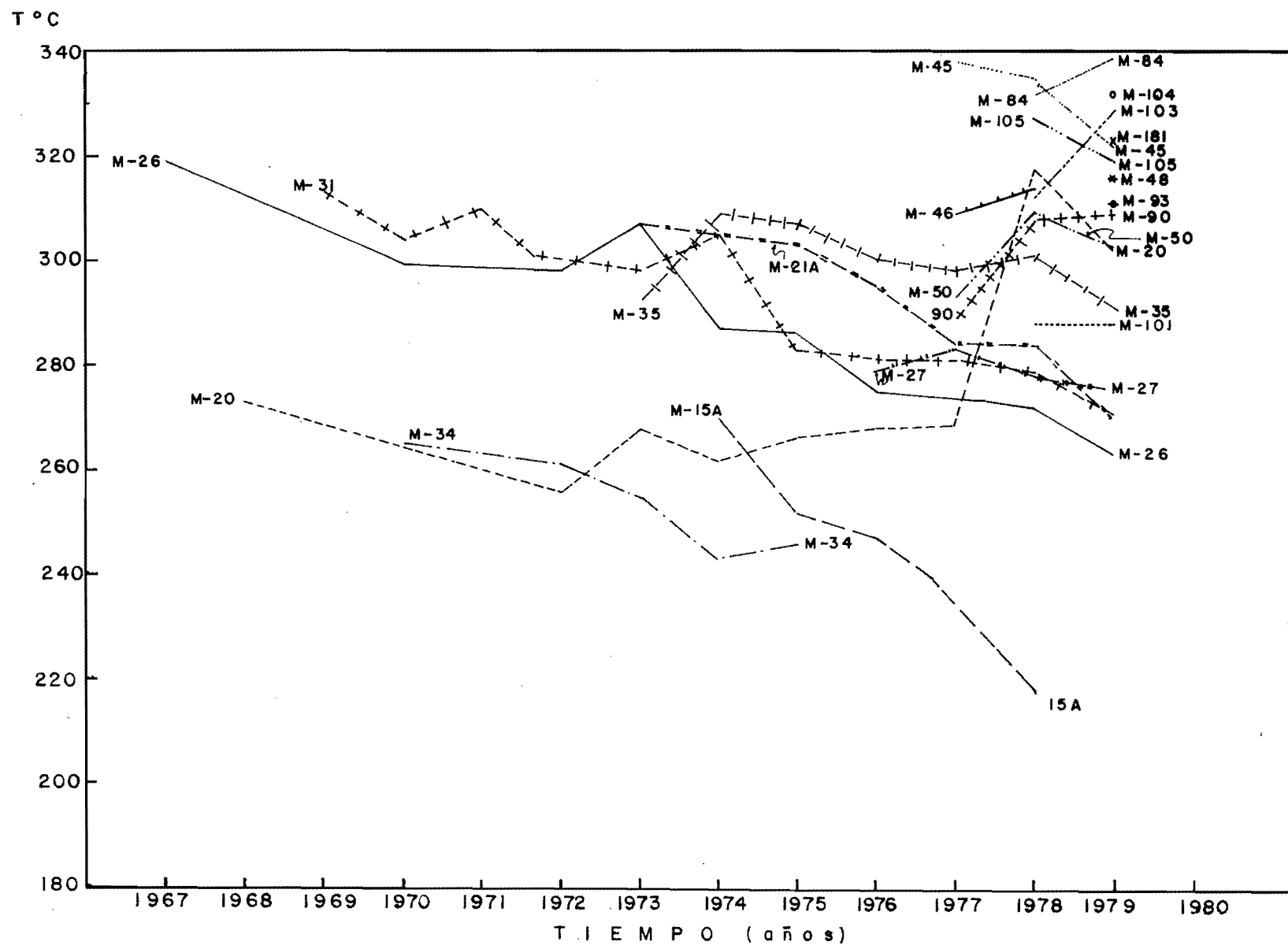


Figura 9a. Variaciones de temperaturas calculadas con el geotermoindicador Na K Ca.

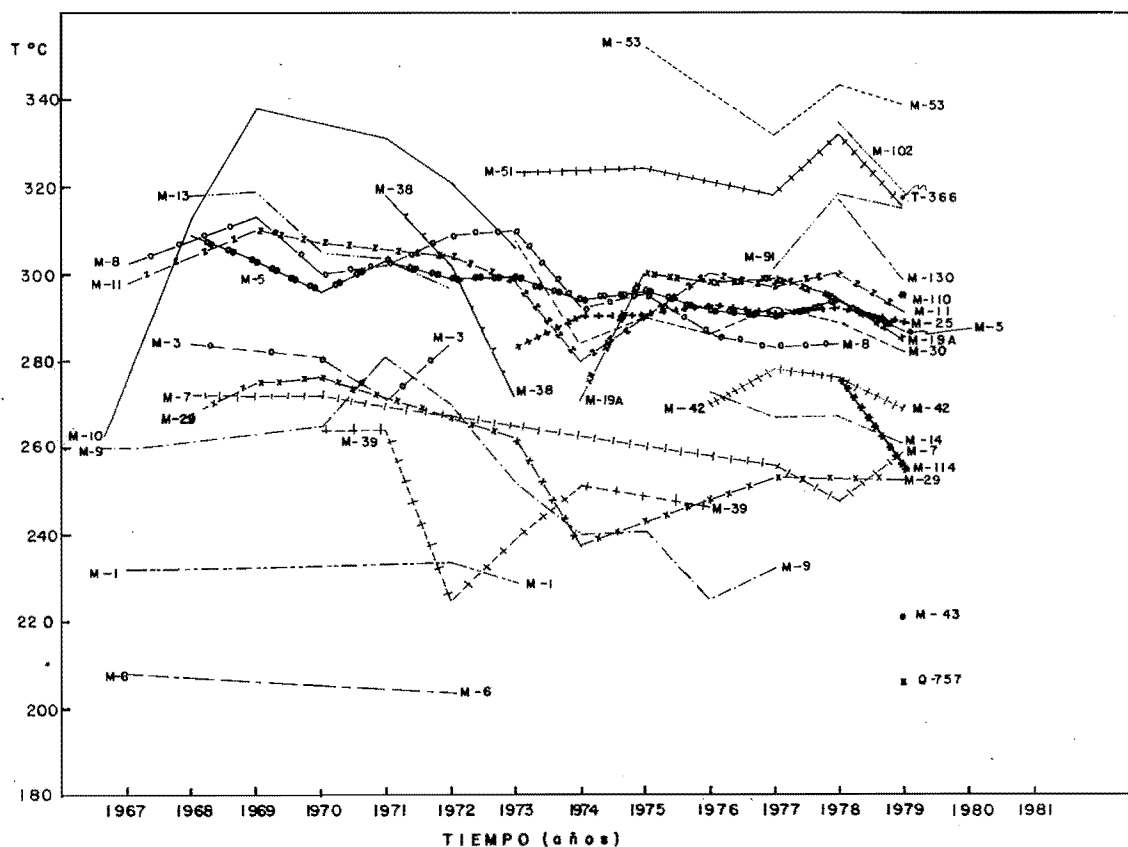


Figura 9b. Variaciones de temperaturas calculadas con el geotermoindicador Na K Ca.

TABLA 1. CONSTITUYENTES QUIMICOS EN EL ACUIFERO DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO.
(VALORES PROMEDIO EN mg/l DE POZOS EN PRODUCCION. 1978)

POZO											INDICES QUIMICOS		TNaKCa	H
	Na	K	Ca	B	Cl	Br	HCO ₃	SO ₄	S. T. D.	Si O ₂	Na/K	Na K Ca	(°C)	(Kj / Kg)
M-5	4739	1134	265	11.8	8892	10.2	38.5	11.2	15692	674	7.10	0.683	294	1311.7
M8+46	4031	935	220	10.0	7462	6.1	34.7	7.4	13068	655	7.33	0.707	287	1273.7
M-11	4874	1216	278	12.8	9108	12.2	25.5	9.3	16715	624	6.82	0.661	300	1344.9
M-14	4507	874	257	12.0	8168	6.0	46.7	6.0	14481	605	8.77	0.785	267	1170.2
M-15A	4223	528	293	10.1	7389	7.6	54.2	3.8	12890	458	13.67	1.010	218	934.5
M-19A	5064	1218	302	N.D.	9343	15.1	24.1	8.7	16880	703	7.07	0.679	295	1317.2
M-20	4876	1364	267	13.4	9334	N.D.	31.3	8.0	16734	667	6.08	0.599	318	1449.9
M-21A	4968	1118	317	11.3	9006	9.2	37.6	9.0	16147	627	7.57	0.719	284	1257.8
M-25	4964	1167	292	12.0	9154	11.2	30.0	12.7	16210	676	7.23	0.689	292	1300.9
M-26	3873	846	296	8.2	7165	8.7	40.3	9.4	12174	671	7.79	0.764	272	1195.4
M-27	3544	763	172	8.15	6315	11.4	47.4	8.4	11746	682	7.90	0.742	278	1226.3
M-29	4996	870	351	11.5	8981	14.6	27.6	5.3	16513	545	9.78	0.843	253	1100.4
M-30	5112	1189	353	11.8	9528	13.0	19.1	8.7	16305	653	7.31	0.705	289	1284.5
M-31	4154	905	252	9.4	7650	13.8	31.3	8.5	13816	628	7.82	0.741	279	1231.6
M-35	4509	1122	227	10.3	8309	16.2	25.2	7.4	14941	732	6.83	0.658	301	1350.5
M-42	4492	930	242	11.6	8212	12.9	27.6	6.8	14507	656	8.21	0.749	276	1215.9
M-45	5230	1604	257	11.5	9979	18.1	12.8	6.4	18141	665	5.56	0.543	335	1559.8
M-53	4607	1478	189	13.0	8744	N.D.	18.6	N.D.	15077	745	5.30	0.516	343	1616.0

**TABLA 2. CONSTITUYENTES QUIMICOS EN EL ACUIFERO DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO.
(VALORES PROMEDIO EN mg/l DE POZOS EN CALENTAMIENTO Y DESARROLLO. 1978)**

P O Z O		Na	K	Ca	Cl	Si O ₂	INDICES QUIMICOS		TNaKCa (°C)	H (KJ/Kg)
							Na/K	Na K Ca		
M-7	a	3925	655	225	7042	359	10.2	0.866	248	1306.1
M-8	b	3334	748	147	6235	701	7.58	0.721	284	1257.8
M-15A	a	3646	534	201	6516	N.D.	11.62	0.928	235	1013.9
M-15A	b	4008	495	283	7126	N.D.	13.80	1.018	215	920.7
M-21A	b	4984	1135	343	9379	N.D.	7.47	0.717	285	1263.1
M-46	b	5498	1481	304	10571	603	6.29	0.610	314	1425.7
M-50	b	4427	1152	204	8087	N.D.	6.54	0.631	309	1396.2
M-51	b	5406	1626	275	10302	635	5.66	0.533	332	1539.5
M-53	a	3362	1184	145	6643	N.D.	4.83	0.500	348	1655.0
M-53	b	4769	1548	195	9003	N.D.	5.24	0.508	346	1640.0
M-84	a	4409	1443	199	8605	N.D.	5.20	0.517	343	1616.0
M-84	b	5923	1720	266	11076	N.D.	5.86	0.552	332	1539.5
M-90	b	3604	989	141	6641	584	6.20	0.610	314	1425.7
M-91	a	4745	1253	197	8517	601	6.45	0.612	314	1425.7
M-91	b	4939	1311	188	8590	738	6.40	0.598	318	1449.9
M-101	a	1706	327	43	2974	N.D.	8.88	0.802	263	1150.1
M-101	b	1680	269	4.0	2700	397	10.62	0.704	288	1279.1
M-102	a	3600	1119	145	6870	N.D.	5.47	0.551	331	1532.8
M-102	b	5528	1640	229	10326	585	5.73	0.540	335	1559.8
M-105	a	4198	1234	190	7762	N.D.	5.80	0.575	325	1493.6
M-105	b	5789	1638	261	11007	679	6.01	0.568	327	1506.4
M-114	a	4316	766	296	7626	N.D.	9.58	0.845	253	1100.4
M-114	b	4247	1022	361	8654	N.D.	7.74	0.750	276	1215.9
M-130	a	3626	1082	210	9203	N.D.	5.70	0.600	317	1443.8
M-130	b	5037	1412	270	9427	703	6.07	0.598	318	1449.9

a = Calentamiento

b = Desarrollo

212

POZO	VALORES PROMEDIO (mg/l) DE POZOS EN PRODUCCION ,(1979)													INDICES QUIMICOS		T°C Na/KCa	H K j/ Kg
	Li	Na	K	Rb	Mg	Ca	B	Mn	Cl	HCO ₃	SO ₄	SiO ₂	STD	Na/K	Na/KCa		
M-5	12.3	4880	1087	8.2	0.29	256	13.0	0.46	8945	38.5	-	647	15692	7.63	0.708	287	1274
M8+46	11.2	3750	816	6.7	0.26	193	8.8	0.21	6873	44.5	-	557	11625	7.81	0.740	279	1232
M-11	15.9	5040	1170	9.0	0.21	271	12.8	0.76	9252	35.0	-	658	17595	7.33	0.695	291	1296
M-14	10.8	4500	828	6.4	1.10	247	11.7	0.19	8100	48.7	-	517	14255	9.25	0.812	261	1140
M-19A	15.7	5244	1172	9.3	0.24	301	12.4	0.82	9557	38.4	-	697	16774	7.59	0.714	285	1263
M-21A	16.5	4250	900	7.0	0.52	306	10.4	0.28	8047	42.9	-	595	13437	8.04	0.777	270	1185
M-25	14.2	4767	1092	8.6	0.21	260	13.2	0.29	8856	38.9	-	608	15920	7.43	0.701	289	1285
M-26	7.6	3279	673	6.6	-	239	6.2	-	6261	39.3	-	553	11737	8.29	0.802	263	1150
M-27	7.6	3568	766	5.5	0.18	198	8.1	0.25	6613	46.0	-	562	11687	7.93	0.754	275	1211
M-29	15.5	4828	849	7.0	0.85	314	11.5	0.31	8591	41.8	-	513	15894	9.67	0.835	255	1110
M-30	13.2	4990	1110	8.8	-	324	11.0	-	9179	37.7	-	615	15220	7.65	0.725	282	1247
M-31	10.4	4051	823	5.7	0.15	218	-	0.20	7153	35.0	-	557	13322	8.37	0.768	271	1190
M-35	11.7	4128	960	7.8	0.14	194	10.8	0.22	7463	33.6	-	642	14132	7.32	0.692	291	1296
M-42	13.1	4600	899	8.3	0.82	231	12.0	0.51	8265	33.3	-	639	15357	8.71	0.777	269	1180
M-45	13.8	5094	1449	10.6	0.20	243	10.4	1.59	9525	25.1	-	633	16369	5.98	0.586	322	1475
M-48	12.4	5818	1565	12.7	0.10	314	10.1	0.45	10861	29.2	1.9	657	19313	6.32	0.606	316	1438
M-50	11.8	4008	1000	8.1	0.07	164	11.3	0.22	7273	46.9	1.9	674	12928	6.82	0.650	303	1362
M-51	11.2	4599	1278	10.1	0.09	224	10.0	0.63	8733	28.9	1.9	609	15266	6.12	0.606	316	1438
M-53	14.9	4639	1446	8.9	0.13	190	12.2	1.78	8508	23.9	-	652	16120	5.46	0.530	339	1588
M-84	13.5	5010	1573	6.8	0.30	242	12.5	3.30	9994	16.4	1.5	631	17050	5.42	0.533	339	1588
M-90	11.7	3905	1016	7.9	0.04	147	9.0	0.31	7179	37.9	5.1	639	12959	6.53	0.627	309	1396
M-91	15.3	5472	1422	13.8	0.09	332	9.1	0.16	10142	23.5	3.0	705	17549	6.54	0.609	315	1432
M-102	-	7387	1801	-	-	242	-	-	11753	-	-	-	-	6.98	0.595	319	1456
M-103	19.2	5607	1605	12.2	0.14	245	12.2	1.31	10510	26.6	-	646	17972	5.94	0.562	329	1519
M-105	17.1	6267	1660	16.2	0.25	299	15.7	0.75	11932	14.3	2.5	670	21488	6.42	0.598	319	1456
M-114	15.2	5222	934	8.7	0.40	403	11.1	0.20	9455	39.9	5.5	619	15184	9.51	0.833	255	1110
M-130	13.9	5305	1293	9.9	0.30	291	12.7	0.80	10090	34.4	4.0	677	16618	6.98	0.663	299	1339

**TABLA 4. CONSTITUYENTES QUIMICOS EN EL ACUIFERO DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO.
(VALORES PROMEDIO EN mg/l DE POZOS EN CALENTAMIENTO Y DESARROLLO. 1979)**

P O Z O	Na	K	Ca	Cl	Si O ₂	INDICES QUIMICOS		TNaKCa (°C)	H (Kj/Kg)
						Na /K	Na K Ca		
M-7 c	4381	777	223	7903	331	9.59	0.819	259	1130.1
M-20 a	4265	1079	209	7382	N.D.	6.73	0.652	302	1356.2
M-43 b	4523	620	459	8204	490	12.42	0.988	221	948.3
M-48 b	6106	1707	300	10692	N.D.	6.08	0.576	325	1493.6
M-91 b	4636	1307	129	8507	721	6.03	0.542	335	1559.8
M-93 a	3078	803	128	5710	N.D.	6.52	0.651	303	1361.9
M-93 b	4737	1224	193	8927	649	6.59	0.621	311	1408.0
M-101 a	3640	948	152	6907	N.D.	6.53	0.639	306	1378.8
M-101 b	2791	600	66	4900	392	7.92	0.706	287	1273.7
M-103 a	3932	1247	164	7610	1225	5.36	0.536	337	1573.4
M-103 b	5265	1616	220	10347	591	5.54	0.529	339	1587.6
M-103 b	6000	1679	248	11212	N.D.	6.08	0.563	329	1519.4
M-104 a	1796	568	78	3728	310	5.37	0.605	316	1437.7
M-104 b	4263	1318	189	8073	410	5.50	0.547	333	1546.2
M-104 b	4624	1399	205	8781	523	5.62	0.552	332	1539.5
M-110 a	3569	878	171	6691	N.D.	6.91	0.679	295	1317.2
M-181 a	3729	1130	194	7529	N.D.	5.61	0.582	323	1480.9
M-181 b	5273	1374	303	10196	N.D.	6.53	0.635	307	1384.5
T-366 a	4105	1900	155	7770	N.D.	7.76	0.704	288	1279.1
T-366 a	4323	1209	190	8551	N.D.	6.08	0.596	318	1449.9
T-366 b	5611	1470	229	10546	777	6.49	0.600	317	1443.8
Q-757 a	3253	363	190	5747	N.D.	15.20	1.063	206	879.6

a = Calentamiento,

b = Desarrollo

c = Calentamiento + Desarrollo

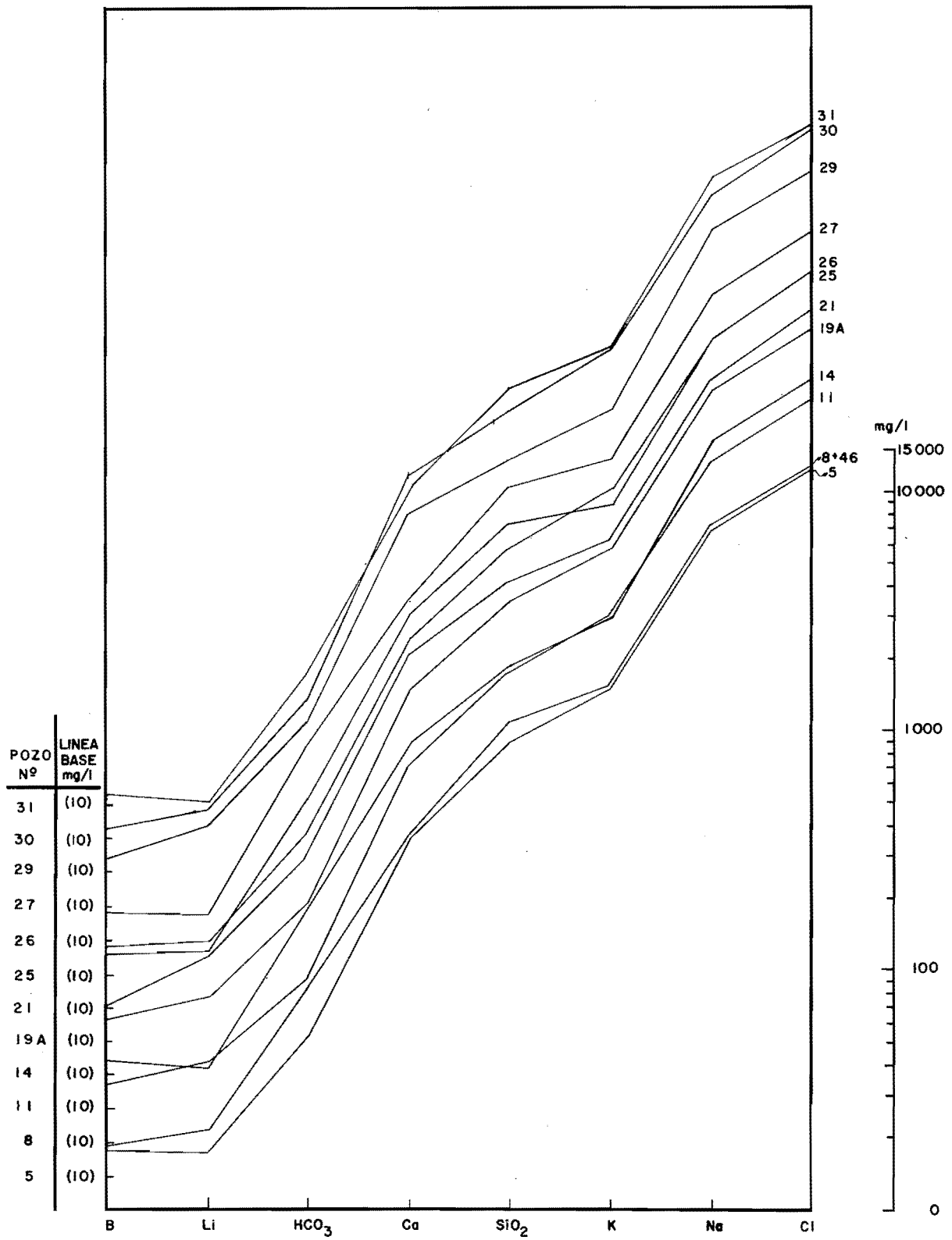


Figura 10a. Diagrama de Schoeller de valores promedio en el acuífero de pozos en producción (1979). (Datos de Tabla 3).

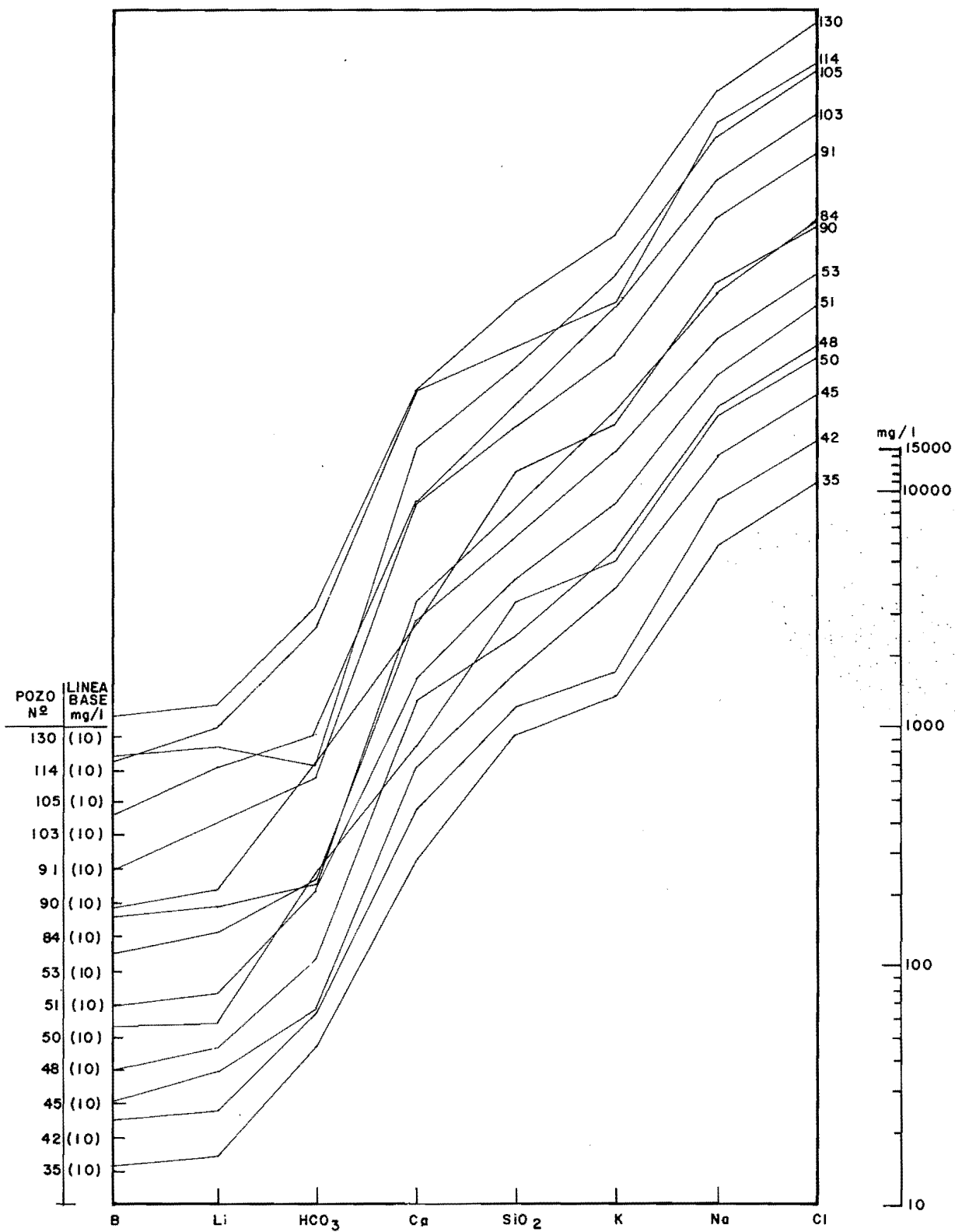


Figura 10b. Diagrama de Schoeller de valores promedio en el acuífero de pozos en producción (1979). (Datos de Tabla 3).

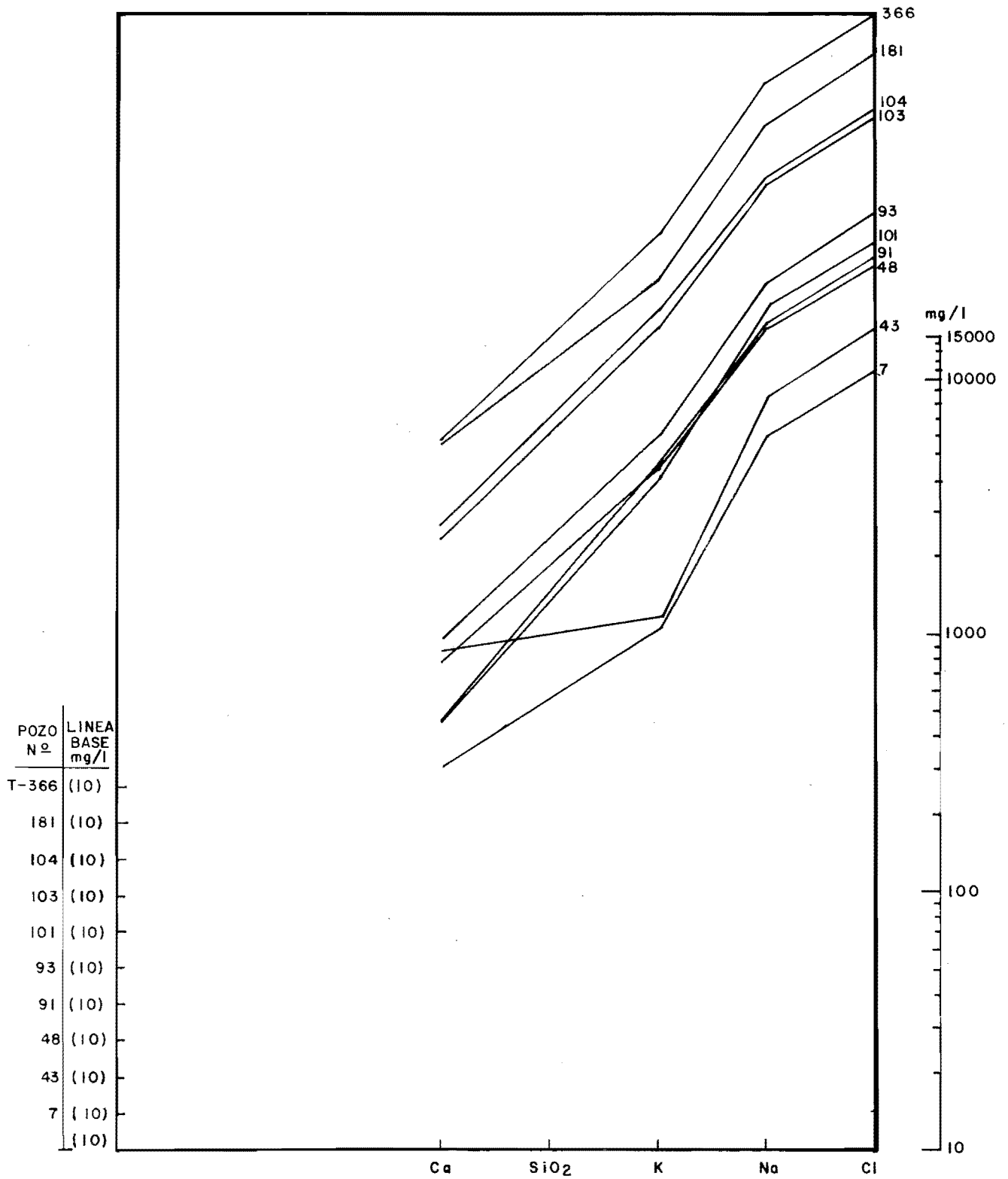


Figura 10c. Diagrama de Schoeller de valores promedio en el acuífero en pozos de desarrollo (1979). (Datos de Tabla 4).

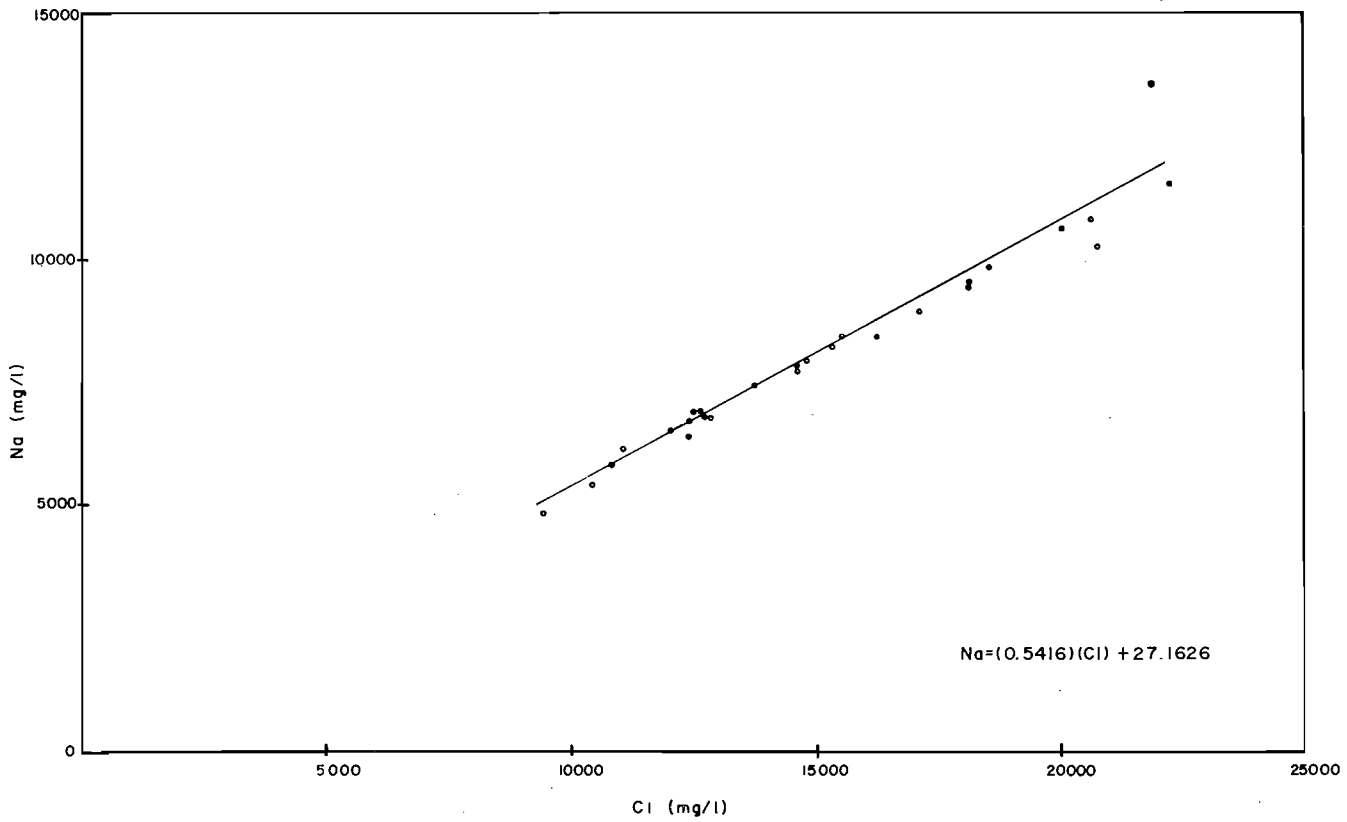


Figura 11a. Relación de cloruros/Na en muestras de agua separada a presión atmosférica de pozos en producción (1979). (Valores promedio).

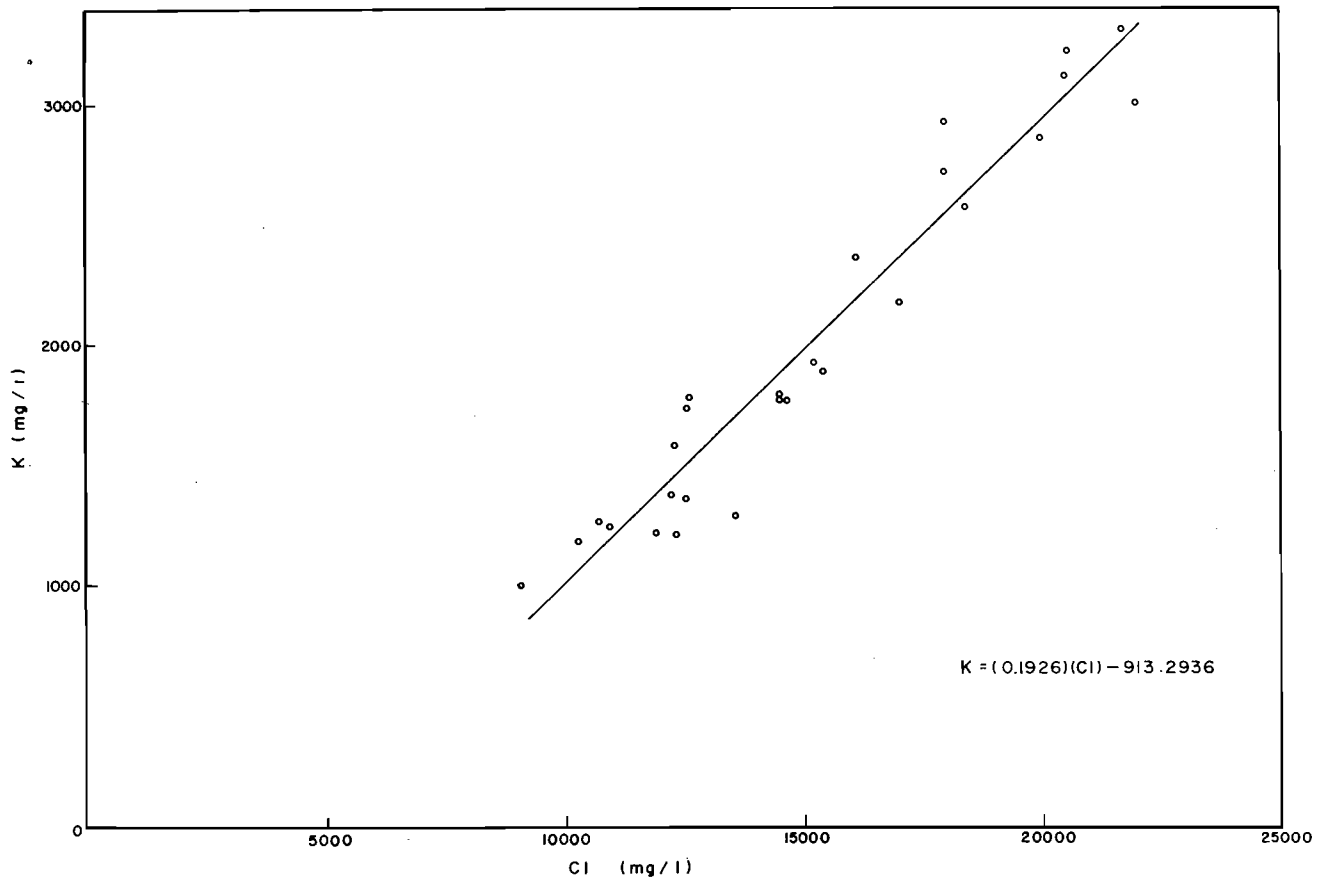


Figura 11b. Relación cloruros/K en muestras de agua separada a presión atmosférica de pozos en producción (1979). (Valores Promedio).

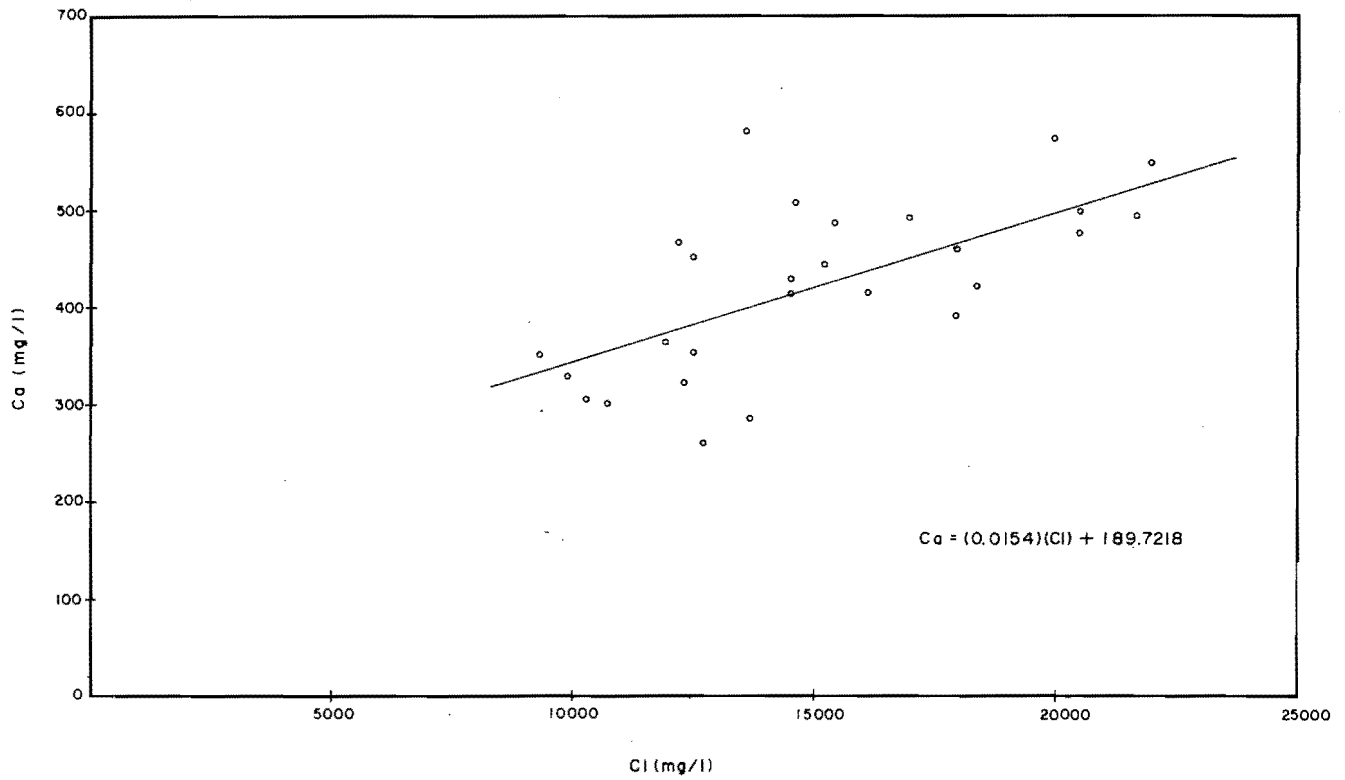


Figura 11c. Relación de cloruros/Ca en muestras de agua separada a presión atmosférica de pozos en producción (1979). (Valores promedio).

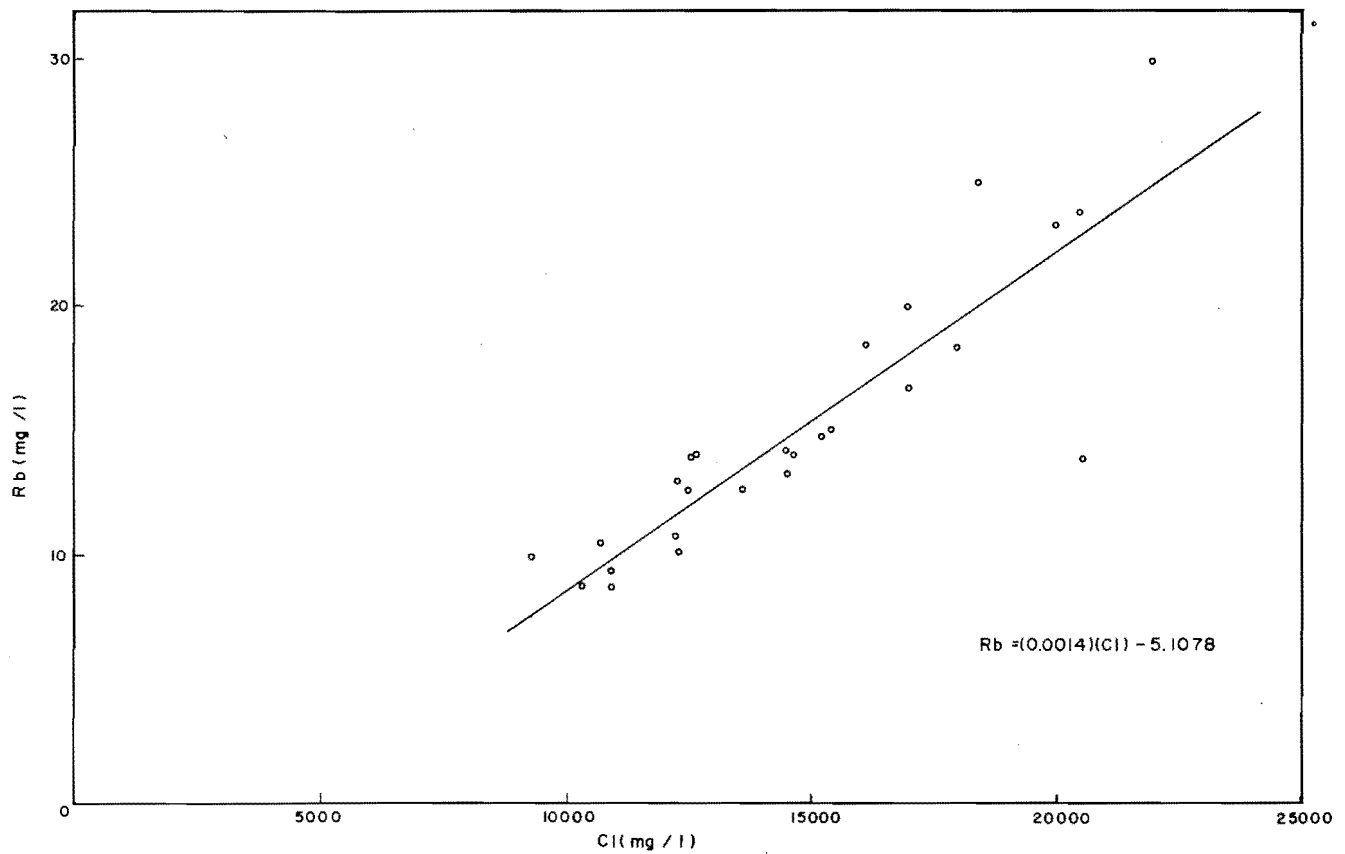


Figura 11d. Relación de cloruros/Rb en muestras de agua separada a presión atmosférica de pozos en producción (1979). (Valores promedio).

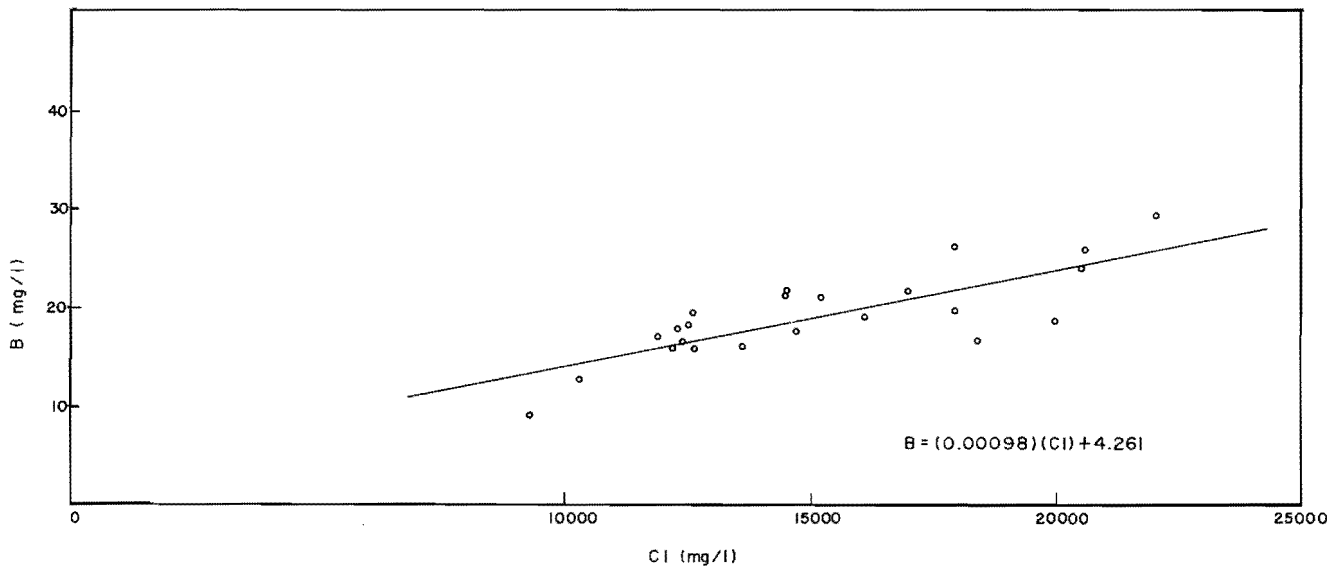


Figura 11e. Relación de cloruros/B en muestras de agua separada a presión atmosférica de pozos en producción (1979). (Valores promedio).

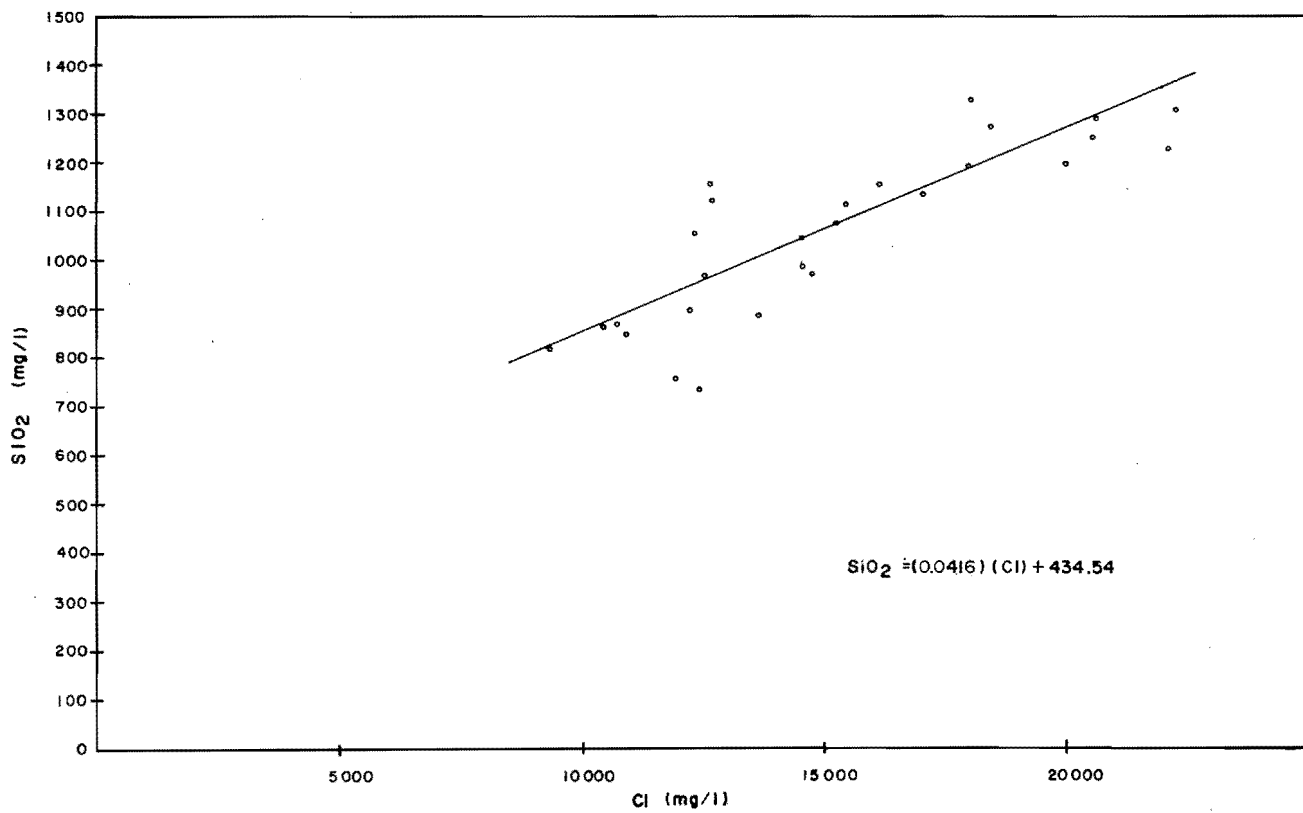


Figura 11f. Relación de cloruros/ SiO_2 en muestras de agua separada a presión atmosférica de pozos en producción (1979). (Valores promedio).

HYDROTHERMAL GEOCHEMISTRY OF THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

ABSTRACT

Currently, the 150 000 KW Cerro Prieto geothermal power plant has four units, each capable of producing 37 500 KW. Units 1 and 2 are fed by 19 wells, units 3 and 4 by 8 wells, and there are 3 other wells in standby. Furthermore, 10 out of 22 other wells that will feed units of a new power plant known as Cerro Prieto II, have been completed.

In this work we present the results of observations of chemical changes and physical processes occurred in the Cerro Prieto Geothermal field along the time due to production. These results refer mainly to the last two years (78 and 79).

Data from chemical analysis of water samples from geothermal fields were used.

We seek to find the distribution of some chemical components, and to draw the distribution contour lines. Then, on this basis, to attempt to interpret the movement of fluid in the aquifer.

We present, in tables and figures, data on the chemical components found in the analyzed fluids.

LOCATION OF THE GEOTHERMAL WELLS

Figure 1 shows the location of some geothermal wells in the Cerro Prieto Geothermal field. Until the present time, October 1979, 71 wells have been drilled. An attempt has been made to show the wells in production currently feeding steam to units 1, 2, 3 and 4. For these wells, abundant chemical data are available. The wells feeding steam to units 1 and 2 are: M-5, M-8, M-11, M-14, M-19A, M-21A, M-25, M-26, M-27, M-29, M-30, M-31, M-35, M-42, M-45, M-53, M-114, M-130, and M-181. That is to say, 19 wells. Another 8 wells feed units 3 and 4. These are: M-48, M-50, M-51, M-84, M-90, M-91, M-103 and M-105. The standby wells M-101, M-102 and M-104 are also shown. Wells M-7, M-43, M-93, M-110, Q-757 and T-366, which have been warmed up and developed during 1979, and for which recent chemical data are available, are also indicated. This location chart is intended to help the reader interpret some figures presented in this work.

DISTRIBUTION OF THE Na - K - Ca INDEX IN THE AQUIFER (1979)

We seek to interpret the movement of the underground water on the basis of the contour distribution of the Na -

K - Ca index in the Cerro Prieto field (Fig. 2). The model shown suggests inflow of colder water from the NW on account of values of 1.1 and 0.82 for the index in wells Q-757 and M-7 respectively. This possibility is supported by the existence of moderately permeable sandstone horizons in that area, and by values of 0.83 and 0.99 for the index in wells M-114 and M-43, respectively.

In the central part of the field, where exploitation began, substantial variations in the values of the index were observed. There, the 0.70 contour line links wells M-5, M-11, M-19A and M-25. In M-20 the value of the Na - K - Ca index is 0.65, and in M-26 is 0.80; the latter is the smallest value in this part of the field. To the West is M-29 and to the East is M-14 with values of 0.84 and 0.81 respectively. This suggests that low temperature water percolates into the producing aquifer from this area.

To the NE and SE, wells M-53, M-84 and M-104 lie on the 0.53 contour line, the lowest value in the current field. These wells lie atop the trace of the Hidalgo fault. To the SW and SE the 0.60 contour line runs through wells M-45, M-102, M-105, and T-366. Surrounding it is the 0.61 contour line, which joins M-48, M-51 and M-91. These contour lines encircle M-103 depicting a value of 0.56. To the South lies M-101 with the highest index (0.71) in this new part of the field. This may be, perhaps, due to a likely flux of cold water coming from the SW part of Laguna Volcano, or because this well has been fed by a shallower aquifer of lesser temperature.

DISTRIBUTION OF THE BASE Na - K - Ca TEMPERATURES IN THE CERRO PRIETO AQUIFER (1979)

With the aid of the average Na - K - Ca index derived for the geothermal wells during 1979 (tables 3 and 4), and using the already calibrated² equation for the Na - K - Ca geothermometer, we computed the temperatures of the fed water and plotted the corresponding distribution contours over the area currently under production (Fig. 3).

With a temperature of 210°C, the lowest temperature water enters the field from the NW. Furthermore, there are wells M-7 and M-114 with temperatures of 260°C. Well M-43 has a temperature of 220°C, confirmed by its high index (0.99).

As mentioned, the central part of the field con-

tinued to show big contrasts. Wells M-5, M-11, M-19A, and M-25 are on the 290°C contour line. The contour lines corresponding to 260°C and 300°C lie on wells M-26 and M-20 respectively. To the East and West of this area, wells M-29 and M-14 with temperatures of 260°C probably indicate influx of cooler waters.

Wells M-45, M-48, M-51, M-91, M-102, M-105 and T-366 are on the 320°C contour line. The 310°C contour line goes through wells M-90, M-93 and M-181. In the southern part of the field well M-101 presents a temperature of 290°C. Wells M-53 and M-84 show the highest temperatures: 340°C. In M-104, which also lies in the new area of Cerro Prieto II, a high temperature, 330°C, is observed.

One can conclude that the area corresponding to the wells that fed Units 3 and 4 is greater than the area originally under production, and that the temperature of the Na - K - Ca geothermometer for the wells studied is within the range 210°C - 340°C.

Fig. 3 shows the average temperatures (Na K Ca) for most wells that fed the power plant during 1979. The highest values were observed in wells M-84 and M-53 (~ 340°C), and the lowest values were found in wells M-29 and M-114 (~ 255°C). The mean temperature, including all the wells, turned out to be 294°C; note that there is a temperature difference of 42°C between the wells located in the new area (U. 3 and 4) and the wells located in the old one (U. 1 and 2), since in the former the observed average temperature is 319°C, and in the latter the mean temperature is 277°C.

DISTRIBUTION OF CHLORIDE IN THE CERRO PRIETO AQUIFER (1979)

Fig. 4 shows the average chloride concentrations in the Cerro Prieto Aquifer for 1979. The area containing the wells corresponding to Units 1 and 2 shows great contrasts. Well M-26 presents the lowest value, 6000 ppm, as compared to 10000 ppm in M-19A. The 9000 ppm contour line extends through wells M-5, M-11, M-25, M-29 and M-30, and the 8000 ppm contour line runs through wells M-14, M-21A, M-35, M-42 and M-43. This anomalous distribution is interpreted as due to pressure drawdown in the aquifer which induces vertical influx of less saline waters from overlying and underlying aquifers. The low chloride content of well Q-757 (6000 ppm) confirms the existence of low salinity water in this area.

The recently drilled wells showed the following values: 12000 ppm in M-102 and in M-105; 11000 ppm in wells M-48, M-103 and T-366; 10000 ppm in wells M-84, M-45, M-181, and M-91. In wells M-53, M-104, M-51 and M-93 concentrations were 9000 ppm. In wells M-50 and M-90 the observed value was 7000 ppm, and in M-101, 5000 ppm.

CHANGES OF CHLORIDE CONCENTRATIONS IN THE AQUIFER, AND OF Na - K - Ca TEMPERATURES FOR PRODUCTION WELLS (1978-1979)

Due to physical processes that take place in the aquifer during production, the concentrations of chemical components in discharge waters from wells have changed both with time and with location in the field. These processes include: 1) Heat transfer between rock and water, 2) Dilution by other waters, 3) Losses or gains of steam. Chloride concentrations at depth and temperature values are very useful to explain the type of processes taking place in the system before and during production.

In figures 5,a and 5,b the observed changes of the computed chloride concentrations for the aquifer are pictorially explained, in relation to the observed Na - K - Ca temperatures for producing wells for 1978 and 1979. The new wells that began producing during 1979 are not included.

The main observations that are considered worth mentioning follow:

In M-5 chloride concentrations remained virtually constant, between 8892 ppm and 8945 ppm, and the temperature decreased 7°C, from 294°C to 287°C; this process is attributed to a slight heat loss by conduction. In M-14 a slight chloride concentration change was observed, from 8168 to 8100, and the temperature decreased from 267°C to 261°C, a case similar to M-5.

The chloride content of M-11 showed an increase, from 9100 to 9250 ppm, while its temperature decreased from 300°C to 291°C. These observations are interpreted as chloride concentration due to loss of steam caused by flashing of the water feeding the well within the formation in response to pressure drawdown. Wells M-19A, M-27 and M-42 showed the same behaviour.

A clear trend towards lower chloride concentrations was showed by the fluid feeding wells M-8, M-46, M-21A, M-25, M-26, M-30, M-31, M-35, and M-45. This effect is due to dilution by cool water from overlying strata, which also caused a decrease in the fluid temperature.

We conclude, based on the values computed with the NaKCa index, that the general trend showed by the wells located in the central part of the field where production first started is a decrease of the fluid temperature. The average value of this decrement was 8°C. Drawdown in this area has been mentioned by other authors^{2/3}. This phenomenon reflects the seeming overexploitation of the producing wells, which are very close to each other. These processes or physical changes are normal in geothermal reservoirs.

The chloride behaviour confirms the presence of three types of processes in the producing field, namely, heat transfer (M-5), dilution (M-8/46), and concentration by steam losses (M-11).

POTASSIUM DISTRIBUTION IN THE AQUIFER (1979)

Figure 6 shows the distribution of the computed potassium concentrations (in ppm) in the aquifer for the wells indicated. This figure confirms the distribution models proposed with the NaKCa index and the temperature obtained with the NaKCa geothermometer.

In the central area M-26 shows a value of 700 ppm, and a 1100 ppm contour line surrounds wells M-5, M-20, M-25 and M-30. Wells M-114 and M-29 show values of 800 ppm. The values corresponding to Q-757 and M-7 are 300 ppm and 600 ppm respectively. The highest values (1800 ppm) were observed in M-105 and in M-102.

In the Southern part of the field wells M-90 and M-50 presented contents of 600 ppm.

VARIATIONS IN THE SILICA CONTENT

In figures 7a, 7b, and 7c the annual averages of the silica concentrations (in ppm) in the aquifer are indicated. In 1979, the general trend observed in the old area has been a slight decrement with respect to the values of 1978. The total decrement is about 10%. Wells M-14, M-26, M-27, M-31 and M-35 were the most affected, showing concentration decreases of 88, 118, 120, 71 and 90 ppm respectively. This decrement in silica concentration seems to indicate that during 1979 quartz deposition has taken place in the permeable formations of the central part of the field. Deposition was probably caused by a slight temperature drawdown, which seems to indicate that flashing continued in the aquifer.

In the same figure, mean values of silica content are shown for new wells such as M-51, M-91 and M-105. These values are compared with those obtained during 1978 while these wells were being developed. A slight trend towards lower values is noticeable. The 1978 data are considered to be nonrepresentative because the samples were taken while the wells were flowing through small diameter orifices.

For the remaining wells (M-50, M-48, M-103 and M-84) the 1979 SiO₂ average concentrations are indicated. Data from 1980 will be needed to explain their behaviour.

SILICA DISTRIBUTION IN THE AQUIFER (1979)

Figure 9 shows the values of silica content in the aquifer, smoothed to ± 100 ppm. The 600 ppm contour line lies in the central part of the field. Wells M-5, M-11 and M-19A present anomalous values: 700 ppm. To the East (M-114),

and West (M-29 and M-43) the silica content falls to 500 ppm. In wells located to the South of this area a 700 ppm silica content is observed, except that M-90 shows a value of 600 ppm, and that M-101 presents a value of 400 ppm, the lowest observed. The highest observed value in recently drilled wells is 800 ppm in well T-366.

TEMPERATURE VARIATIONS IN THE WELLS COMPUTED WITH THE NaKCa GEOTHERMOMETER

The temperature variations in the Cerro Prieto geothermal reservoir have been continuously recorded by means of the NaKCa geothermometer. Figures 9a and 9b show the mean annual variations for some wells. During 1979, wells M-84, M-103, and M-104 presented the highest temperatures. In M-45 the trend has been to decrease from 338°C in 1977 to 335°C in 1978 to 320°C in 1979. The temperatures of the wells M-21A, M-26, M-27, M-31 and M-35, which are located in the old area, have gradually decreased with time. Wells M-21A and M-26 were the most affected: M-21A began producing in 1973 at a temperature of 305°C which decreased gradually to 284°C in 1978 and to 270°C in 1979; the initial temperature of M-26 was 320°C in 1973, and decreased to 272°C in 1978 to 263°C in 1979.

OBSERVED CHEMICAL COMPOSITIONS OF THE WELLS IN 1978 AND 1979

Table 1 shows the concentrations of some chemical components in the aquifer of the geothermal field. These concentrations are the average values corresponding to the chemical analysis performed for each well during 1978. The samples were taken under production conditions. Table 3 shows the data corresponding to the producing wells analyzed during 1979. The values shown are averages computed at the aquifer conditions.

Tables 2 and 4 present the analytical results obtained for the wells during their warming and development stages (1978 and 1979). Also shown in the tables are the average values corresponding to the Na/K and NaKCa chemical indexes, the temperatures computed with the NaKCa geothermometer for the waters feeding the wells, and the enthalpy values computed at the aquifer temperatures.

Table 3 shows the following concentration ranges (in mg/l) for the chemical components of the wells during 1979: Li, 7.6 to 19.2; Na 3279 to 7387; K, 673 to 1801; Rb, 5.5 to 16.2; Mg, 0.04 to 1.1; Ca, 147 to 403; B, 6.2 to 15.7; Mn, 0.16 to 3.3; Cl, 6261 to 11932; HCO₃, 14.3 to 48.7; SO₄, 1.5 to 5.5; SiO₂, 513 to 705; TDS (total dissolved solids), 11625 to 21488.

Figures 10a, 10b and 10c present Schoeller diagrams. The concentrations of some chemical components have been plotted in a logarithmic scale; this results in a pic-

torial representation of the chemical composition of the fluids in the wells. The data for each well are arranged in numerical order; the diagram baselines are indicated.

Following procedures described by E. Mazor and A. Mañón⁴ for graphical processing of chemical data obtained from geothermal wells, the concentrations of Na, K, Ca, Rb, B and SiO₂ were plotted against chloride concentrations. Good correlations were found. The concentrations are average values obtained from samples of water separated at atmospheric pressure, from wells that were in production in 1979. It has been demonstrated that heat transfer, concentration and dilution processes continue to take place in the field (see figs. 11a through 11f).

ACKNOWLEDGMENTS

We thank Ing. A. Mañón M. Superintendente General de Estudios for his encouragement and collaboration for the completion of this work. We also thank the technical, administrative and non-specialized personnel of the Superintendencia General de Estudios of Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, CFE, which has been involved in this project.

FIGURE AND TABLE CAPTIONS

- Figure 1. Location of geothermal wells in Cerro Prieto geothermal field.
- Figure 2. Distribution of the NaKCa index in the aquifer (1979).
- Figure 3. Distribution of the base NaKCa temperatures (1979).
- Figure 3a. Average value of the base NaKCa temperature. Wells in production (1979).
- Figure 4. Distribution of chloride in the aquifer (1979). mg/l $\times 10^3$.
- Figure 5a. Changes in the chloride concentrations in the aquifer and base NaKCa temperatures for wells. Production (1978-1979).
- Figure 5b. Changes in the chloride concentrations in the aquifer and base NaKCa temperatures for wells. Production (1978-1979).
- Figure 6. Potassium distribution in the aquifer (1979). mg/l $\times 10^3$.
- Figure 7a. Annual averages of the silica concentrations in the aquifer (mg/l).
- Figure 7b. Annual averages of the silica concentrations in the aquifer.
- Figure 7c. Annual averages of the silica concentrations in the aquifer.
- Figure 8. Silica distribution in the aquifer (1979). mg/l $\times 10^2$.
- Figure 9a. Temperature variations computed with the NaKCa geothermometer.
- Figure 9b. Temperature variations computed with the NaKCa geothermometer.
- Table 1. Chemical components in the aquifer of the Cerro Prieto geothermal field. (Average values in mg/l of wells in production. 1978.)
- Table 2. Chemical components in the aquifer of the Cerro Prieto geothermal field. (Average values in mg/l of wells during warming and development. 1979).
- Table 3. Chemical components in the aquifer of the Cerro Prieto geothermal field, Baja California.
- Table 4. Chemical components in the aquifer of the Cerro Prieto geothermal field. (Average values in mg/l of wells during warming and development. 1979.)
- Figure 10a. Schoeller diagram of average values in the aquifer of wells in production (1979). (Data from Table 3).
- Figure 10b. Schoeller diagram of average values in the aquifer of wells in production (1979). (Data from Table 3).
- Figure 10c. Schoeller diagram of average values in the aquifer of wells being developed (1979). (Data from Table 4).
- Figure 11a. Correlation of Na/chloride in samples of water separated at atmospheric pressure from productive wells (1979). (Average values).
- Figure 11b. Correlation of K/chloride in samples of water separated at atmospheric pressure from productive wells (1979). (Average values).
- Figure 11c. Correlation of Ca/chloride in samples of water separated at atmospheric pressure from productive wells (1979). (Average values).
- Figure 11d. Correlation of Rb/chloride in samples of water separated at atmospheric pressure from productive wells (1979). (Average values).
- Figure 11e. Correlation of B/chloride in samples of water separated at atmospheric pressure from productive wells (1979). (Average values).
- Figure 11f. Correlation of SiO₂/chloride in samples of water separated at atmospheric pressure from productive wells (1979). (Average values).